

拠点構想等の概要（日本語で記載。A4版3枚以内）

ホスト機関：国立大学法人 東京工業大学

ホスト機関長：三島 良直

拠点名：地球生命研究所

拠点長：廣瀬 敬

拠点構想責任者（2012年12月時点）：廣瀬 敬

事務部門長：櫻井 隆

1) 拠点構想の概要

本拠点は「生命はいつどこで生まれ、どのように進化して来たのか」という、ギリシャ哲学に始まり自然科学が問い続けてきたテーマに挑む。具体的には、生命誕生前後の初期地球のダイナミクスと環境、その後の環境変動の解明に重点を置き、生命ならびに持続可能な生態系の誕生とその進化を探る。微生物の多様な代謝や生理、生態系の研究を通じて、生物進化と惑星進化とを関連づけると同時に、枢要な役割を果たしたと見られる化学的性質や惑星環境を特定する。実証ベースの研究も指向し、深海や地表下の微生物生態系から地球外の始原的小惑星に至るまで、幅広い原始地球類似環境を用いて、初期の地球環境に迫る。また、このような研究を通じて、地球の特殊性と普遍性を理解し、惑星生物学へと発展させて、太陽系内外における地球外生命探査計画に貢献する。

2) ミッションステートメント及び/又は拠点のアイデンティティー

生命の起源に関するこれまでの研究では原始生命体における生化学が中心だった。地球は生命のゆりかごとされ、支えであって相互作用するものとの位置づけはなかった。生命とは周囲の環境と物質・エネルギーのやりとりを通じて成り立っているものである。またその結果として、生命活動が環境に影響を与えている。このような観点から、本拠点では地球と生命の双方の研究を重要視する。

NASAアストロバイオロジー研究所（NAI）の研究テーマは本拠点のものと比較的近いが、彼らと比較し我々は、次の点を重要視する。1) 生命の起源と進化全般にわたる地球の役割。2) NAIがバーチャルな研究プログラムであるのに対し、本拠点は、異分野の研究者が集結し、日常的に活発に交流する研究棟を有する研究所として確立されている。本拠点のサテライト機関であるプリンストン高等研究所で行われている学際研究プログラムをモデルとして、研究交流を推進する。

本拠点では学際研究を強く推進しており、幅広い分野の世界トップの科学者を惹きつけている。彼らと本拠点メンバーとの間で活発な研究交流が行なわれている。こうした科学者達に対し、彼らの研究内容をあらかじめ細かく限定しない。一流の科学者をまずは引き寄せ、彼らのスキルや興味に応じて、あとからそれらを定めていくことにする。

研究活動とリンクさせたアウトリーチ活動や教育も積極的に行う。進行中のはやぶさ2ミッションや、計画中の火星衛星へのMMXミッションなどの探査計画、地球や生命の起源、地球外生命といった話題は、一般の人々にとっても非常に興味深いはずであり、アウトリーチに最適のテーマである。教育に関しては、日本全国から選抜した高校生向け夏期インターンシッププログラムを立ち上げる。こうした活動は本拠点およびその受け入れ機関である東工大が国内外での存在感を高めるよい機会となるものである。

3) 対象分野

固体地球科学・惑星科学・地質学・環境微生物学・微生物ゲノム科学・システム化学・複雑系科学・比較創発論、およびこれらの融合分野

国内外の研究開発動向：以下に挙げる分野で大きな進展があった。1) 初期地球環境を再現する実験技術の確立、2) 極限環境下の生態系の研究、3) 前生物化学や計算化学、4) 惑星形成理論の再構築と太陽系

外の地球型惑星の観測。本計画の主任研究者らは、これらの進展に大きく貢献している。

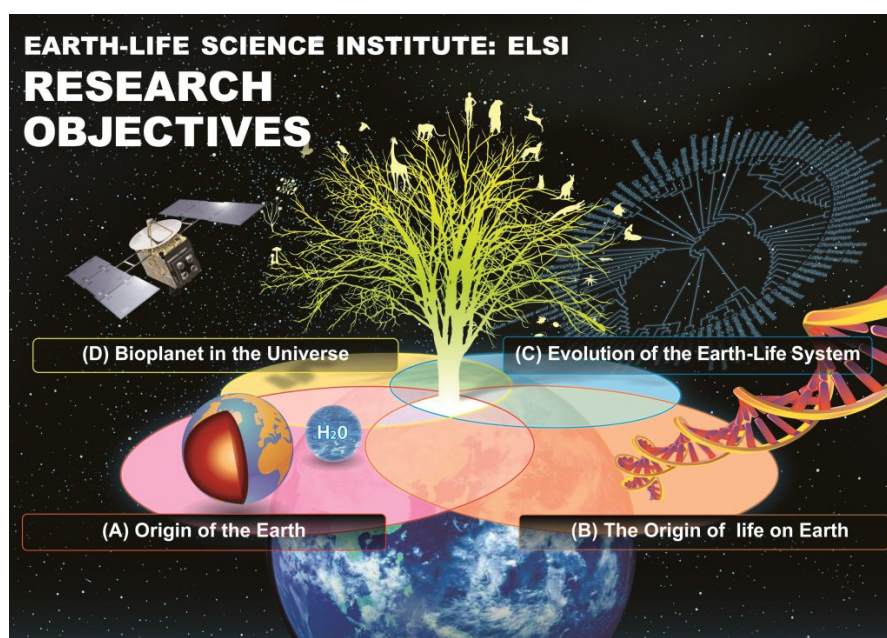
我々の優位性：東京工業大学が世界をリードする超高圧実験、惑星形成理論、地球史研究をベースに初期地球環境の研究に取り組む。また、原始生態系の解明を目指した、分子・進化微生物学や極限環境微生物生態系の分野でも我々は国際的にリードしており、対象分野における我々の優位性は明らかである。

4) 研究達成目標

本拠点では、次の科学的課題の解明に取り組む：

- ・ 初期地球の環境はどのようなものであったか？
- ・ 最初の生態系はいつ、どこで誕生したのか？
- ・ 生命の進化に地球と宇宙はどのような影響を与えたのか？
- ・ 宇宙の中で地球はどれほどユニークな惑星なのか？

これらの成果を惑星生物学として確立し、太陽系内および太陽系外の天体を対象とする、近未来の探査や観測の計画立案にも寄与する。



5) 拠点運営の概要

本拠点は、学長が特に認める研究拠点組織（研究特区）として学長直属の組織としている。運営会議、所長室会議、各種委員会及び国際アドバイザリーボード等の助言のもと、全てのメンバーの任命や予算執行に関する権限を含め、拠点長は拠点に関するあらゆる事の決定権を持つ。事務部門長のもとに、英語を公用語とし、研究推進重視の事務組織を構築する。研究者を支援するURA（所長補佐）に加え、ライフアドバイザーは、日本語教育のほか、外国人研究者及びその家庭に対し様々な支援を行う。広報チーフは、本拠点のアウトリーチ活動全般に対する責任をもつ。また、国際連携コーディネーターは、研究資金獲得支援、外国人研究者のリクルートなどを担う。

6) 研究体制

[主任研究者数] 15名（うち外国人研究者8名）平成29年4月時点

[研究者総数] 63名（うち外国人研究者25名）平成28年度末時点

[拠点構成員総数] 117名（RAを含む、短期ビジターを除く）平成28年度末時点

[主要な主任研究者]（現在の所属を記載）

Piet Hut（プリンストン高等研究所/地球生命研究所）、Joseph L. Kirschvink（カリフォルニア工科大学/地球生命研究所）、Jack Szostak（ハーバード大学）、入舩徹男（愛媛大学）、廣瀬敬（地球生命研究所/東京大学）、井田茂、John W. Herndl、丸山茂徳、吉田尚弘、George Helffrich、Eric Smith、Irena Mamajanov、上野雄一郎、Shawn McGlynn、中村龍平（東京工業大学）

[サテライトを設置する機関] 愛媛大学、東京大学、プリンストン高等研究所、ハーバード大学

7) 環境整備の概要

- ・本拠点は全研究者に対し、各自の研究に集中できるようにすることを保証する。外国人研究者とその家族に対しては、URAと生活アドバイザーが、あらゆる面での支援を行う。東京工業大学所属のPIは本拠点に所属替えとなり、少なくとも学部学生向けの授業をする義務は免除される。
- ・海外から参加するPIに対し、スタートアップ資金として1-2千万円を提供する。拠点長との相談により、それ以上の支援も可能とする。
- ・英語を公用語とし、研究推進重視の事務部門を、独自の新しい慣行を採用して構築する。事務員にも最新の研究成果を伝えている。
- ・各研究者の研究活動は、学術的業績に基づいて評価される。本拠点の他の活動、例えばアウトリーチ活動等への寄与も、評価される。これらの評価は、年俸の更新に反映される。
- ・ホスト機関は本拠点の活動に十分な研究用スペース（約4973 m²）を、大岡山キャンパスに確保しており、中規模の研究集会を拠点内で開催することができる。

8) 世界的レベルを評価する際の指標等の概要

拠点の評価に際しては、研究活動の水準や研究所・研究者の外部からの評価など、さまざまな観点から包括的な評価を行う。学際的研究を促進し、新たな学問領域を創出するための取組みを慎重に考慮することも重要である。上記指標に基づく現状評価によると、ELSIはWPI拠点としてすでに確立されており、今後さらなる発展を遂げる見通しである。

9) 研究資金等の確保

平成28年度まで継続してWPI研究資金と同程度以上の研究資金を獲得した。科研費を含めた国内の研究資金獲得に関して、今後もURAが中心となり、研究者への獲得支援を行なっていく。

また、ELSIは東京工業大学の海外での法人設立を大学本部に申し出ている。海外ファンドからの寄付金等の獲得を推進することによって財政基盤を盤石のものとしたい。

10) 充当計画

充当計画	年度 (平成)	29	30	31	32	33	合計
	WPI補助金 (百万円)	610	610	610	610	610	3,050
	ホスト機関からの運営費 (百万円)	90	90	90	90	90	450
	合計 (百万円)	700	700	700	700	700	3,500

(交換レート: JPY/USD=100)

11) ホスト機関からのコミットメントの概要

- ・本学は、2030年を目処に世界のトップ10に入るリサーチユニバーシティを目標に、研究マネジメント強化、研究組織の再構築及び研究環境整備に取り組んでいる。本拠点を学長直属の研究拠点組織（研究特区）として位置づけると中期計画にも明記しており、本拠点を長期にわたり全面的に支援していく。
- ・引き続き、学長裁量経費から年間9千万円を支援する。
- ・デニュアの教員6名をELSIに措置するなど必要な人員の支援を行う。
- ・ELSI-2として既存建物（2,670 m²）を提供し、また、新たな研究棟（ELSI-1: 5,000 m²）を平成26年度に竣工して、ふさわしい研究環境を整備しており、さらなる必要な支援を行う。
- ・拠点で実施された制度のうち効果的な制度は、拠点内にとどまらず大学全体の制度として幅広く取り入れている。

拠点構想（日本語で記載）

ホスト機関：国立大学法人 東京工業大学

ホスト機関長：三島 良直（学長）

拠点名：地球生命研究所

拠点長：廣瀬 敬

拠点構想責任者（2012 年 12 月時点）：廣瀬 敬（東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻 教授）

拠点構想の概要

※ 拠点構想の全体概要について簡潔に記載すること。

1. 研究目的

地球生命研究所（Earth-Life Science Institute。以下、「ELSI」という。）は、「生命はいつどこで生まれ、どのように進化して来たのか」という、ギリシャ哲学に始まり、自然科学が問い続けてきた人類の根源的な謎の解明を目的とする。

初期の地球において生命の誕生に不可欠であったと見られる環境や惑星科学過程、およびその変化を理解することに研究の重点を置き、生命の起源と初期進化、持続的生命システムの形成について、地質学的変遷を踏まえて解明する。微生物の生化学、生理学や生態学に見出される幅広い多様性を窓口として、過去から現在に至るまで生物圏がどのように地球環境に依存してきたかを詳細に把握すると同時に、重要な役割を果たしたと見られる化学的性質や惑星環境を特定する。原始地球環境の研究にアプローチするにあたり、惑星観測や理論・モデリング研究と同時に、深海や地表下の微生物生態系から地球外の始原的小惑星に至るまで、幅広い原始地球類似環境を用いる。このような研究を通じて、地球の特殊性と普遍性を理解し、また、太陽系内外における生命探査に示唆を与える。

ELSI は設立以来、初期地球や初期生命の研究・理解に必須である下記 5 分野を統合し、徹底した異分野融合研究を展開している。各分野における課題に総合的に取り組むことで、創発現象を比較してより深く理解することが可能となる。この新たな学問を「比較創発論（comparative emergence）」と名付け、ELSI はその創出に挑戦する。

1. 地球科学

生命が誕生し、進化した初期の地球環境を明らかにする、初期地球を対象とした地質学、地球化学、地球物理学。

2. 化学

生命の構造やダイナミクスの基盤となるユニークな物理的環境を対象とする、合成化学、計算化学、システム化学。

3. 生命科学

生命の機能と進化の理解を担うと同時に、生命と惑星環境の間の根源的な関係を探求する、生物化学やシステム生物学から環境微生物学や微生物生態学まで多岐にわたる分野。

4. 天文学

地球がどのように形成されたのか、そして生命誕生時の地表環境を明らかにし、銀河系内における地球の特殊性や普遍性、ならびに太陽系内外の地球外天体に生命が存在する可能性を探求する、惑星から銀河まで広範なスケールを対象とする天文学。

5. 学際科学

「生命の本質とは何か」、「生命はいつどのように生まれ、そして進化したのか」という古典的問題に

対して、新たな道を示すことが期待される、数学、物理学、化学に始まり、コンピューター科学や認知科学へと続く多様な分野とその融合科学。

なぜ、これら 5 分野なのか。ELSI が生命起源の研究に導入する最も根本的な変革は、生命は本質的に惑星の形成と進化の過程の一部であるという認識である。つまり、形成途上の惑星における固有の構造やダイナミクスが生命秩序の形成と維持への枠組みを決定し、その枠組みの中で生命が宿るのである。この認識に沿って考えると、生物科学は初期生命の詳細や、生命がより複雑かつ堅牢になった過程を明らかにするだけでなく、既存の惑星秩序の延長としての性質に加えて全く新たな性質を併せ持つ、生命の本質を理解することを可能にする。今日の生命は本質的に化学的プロセスであり、生命の構成要素がどのように形成され、どのように進化の基盤となったかを理解するには化学の知識が必要であるが、生命が化学的現象であるという事実には、さらに大きな意味がある。化学は分子を作り、操作する技術に関する学問であるにとどまらず、あらゆる原子や結合、位相についての各論と総論を組み合わせることにより、単純な法則にもとづいて複雑な組織化が起こる過程を説明する一連のコンセプトを提供する。したがって、生命の起源と本質を理解する上で、地球科学、化学、生命科学のいずれも不可欠である。

もし、生命がいつ、どこで、どのように生まれたかについて、大まかにでも妥当な合意があるとすれば、地球科学と化学、生命科学は連携して、生きた細胞の誕生に始まる、生命と地球環境の共進化モデルを精緻化できるだろう。しかし、我々が置かれている現状は、これとは程遠い所にあると言わざるを得ない。「生命がどのように形作られたか」という問いについては、それが起こり得る環境を多角的に検討すると同時に、初期生命を形作る分子がどのように結合し、複雑に成長・増殖しながら進化することを可能にする持続性・柔軟性を備えた自律的反応を始めたのか、という問題も含めて非常に広範囲な議論を継続する必要がある。どのアイデアが正しいか、という問いに答えることができない現状では、直面する課題から一歩離れた地点でそれを見直すこと、また、地球科学や化学、生命科学以外の自然科学、数学分野からの思考や示唆を議論に導入することも有益だろう。

最新の天文学的観測によれば、太陽型の恒星の 20% 以上がハビタブルゾーン内に地球と同規模かより大型の惑星を有すると考えられる。このような観測結果と惑星形成の理論的モデリングを組み合わせることによって、銀河系内における地球の特殊性・普遍性についての重要な手がかりが得られる。ハビタブルプラネット(生命の生存が可能な惑星)について、惑星表層環境の多様性を考慮した議論が進展した結果、太陽以外の恒星のハビタブルゾーン内にある系外惑星上に生命が存在する可能性に加えて、太陽系内の氷衛星の内部海に生命が存在する可能性も考慮されるようになった。このような議論を通じて地球と地球上の生命について、より一般的な視点から考察することが可能となろう。ここに天文学の果たす役割がある。

学際科学は、広範な学術的研究分野を結びつけるものである。

例えば、20 世紀、ある著名な物理学者が生物学分野の研究に足を踏み入れたことが端緒となって、生物学分野の論理的思考方法が革新されたという逸話がある。同様に、自律的反応プロセスの抽象的モデルの構築（化学原理の理解を基盤とするが、場合によっては一般化することが可能）に学ぶことにより、生命の起源においても、より高レベルの抽象化が可能となるかもしれない。生命の起源に関わる問題を考える上で、コンピューター科学も独自の重要性を発揮する可能性がある。例えば、コンピューターによる計算の応用を進めることで、以前には不可能であったような高度に複雑な化学反応ネットワークなどのシステム解析が可能となると同時に、計算アルゴリズムを抽象化し理解することによって、化学的・進化的現象の中に、通常は認識されないような性質を見出すことができるかもしれない。コンピューター計算が持つ両方の役割をしっかりと組み込むことは、ELSI における学際的アプローチを成功に導く鍵である。また、パターン認識やパターン生成などの認知プロセスを研究する認知科学者の貢献も期待される。例えば、認知科学者は、現在の生命を研究対象とする生物学者には思いつかないようなアプローチを原始細胞間の相互作用の研究に採り入れるかもしれない。こうした観点から、第 5 の分野に含まれるコンピューター科学や認知科学が ELSI の研究には不可欠である。

より具体的な ELSI の研究テーマは以下の通り。

(A) 地球の起源

- A1. 地球はどのようにして生まれたのか？
- A2. 生命を育む惑星の形成にマグマオーシャンはどのような役割を果たしたのか？
- A3. 地球内部の構造、化学組成やダイナミクスはどのように進化したのか？

(B) 地球－生命システムの起源

- B4. 生命誕生時の海と大気はどのようなものだったのか？
- B5. 初期地球の地質学的条件は、生命の起源にどのような影響を与えたのか？
- B6. 「プロゲノート」の遺伝的システムとはどのようなものだったのか？

(C) 地球－生命システムの進化

- C7. 生物のエネルギー変換システムはどのように変遷し、地球と共に進化したのか？
- C8. 原始的な酵素やゲノムはどのようなものだったのか？祖先型を再構築できるか？
- C9. 固体地球の変動は地球生態系をどう変えたのか？

(D) 宇宙における生命惑星

- D10. 宇宙の中で地球はどれほどユニークな存在なのか？
- D11. 地球外生命を探す手だては？
- D12. 惑星環境において生命の誕生を導く原理とは何か？

これらの研究に対する ELSI の優位性は明白である。

初期地球のユニークな環境については、高温・高圧実験、惑星形成理論、(地質記録に残る) 地球史の解読を統合して取り組む。東京工業大学はこの分野の研究を先導しており、国内外の他機関の追随を許さない。また、ELSI に参画する日本人研究者の中には、分子・進化微生物学、熱水噴出孔のような極限環境などにおける多様な微生物生態系の研究の第一人者が含まれており、微生物エネルギーシステムの比較研究と地質学・地球化学研究の融合に主導的な役割を果たしている。

さらに、東京工業大学は、上に掲げた研究課題を進める上で必要な固体地球科学、惑星科学、地質学、物質科学、環境生物学、分子生物学、微生物ゲノム科学に関連する異分野融合研究を伝統的に数多く進めており、豊富な経験を有している。例えば、2004 年から始まった COE (Center of Excellence) プログラムとそれに続く Global COE プログラムでは、ELSI の研究分野構成と似たチームで、共同研究が精力的になされてきた。ELSI が目指す研究は、COE プログラム及び GCOE プログラムで展開した異分野融合研究を下敷きとして、地球－生命システムの誕生と進化に対して地球内部や宇宙が果たす役割を考究するものである。

これらに上述した第 5 の研究分野を新たに加え、例えばプリンストン高等研究所の学際研究プログラムなど、多彩な異分野融合研究グループと強固な国際連携を築きながら、研究を促進させる計画である。

2. 組織

(1) 全体

研究所長には廣瀬敬教授が就任し、世界を先導する研究拠点、ELSI の構築に全責任を負う。研究所長は、最先端の研究を展開している優秀な研究者をリクルートし、彼らに明確な役割と独立して研究する場を与える。研究所の運営全般に関する最終的な決定権は研究所長が有し、研究者と事務スタッフを任命する。運営会議及び所長室会議は、国際アドバイザリーボードと共に、研究所の運営、スタッフの人事や評価などについて研究所長への助言・サポートを行う。

ELSI は 8 人の外国人主任研究者 (うち 1 名は女性) と、愛媛大学、プリンストン高等研究所、ハーバード大学のサテライト機関から各 1 名の主任研究者を含む総勢 15 名の主任研究者を擁する (平成 29 年 4 月時点)。また、准主任研究者を雇用し、彼らは 5 年より長い任期を有する。ELSI でリサーチサイエンティストと呼ばれる若手研究員は、個々の研究グループとの結びつきが緩やかな立場で自由に研究を進めている。彼らは互いに合意したメンターから常時、体系的なフィードバックやアドバイスを受けることができる。研究員の活動・業績の評価は毎年行い、優れた業績を挙げた研究員には、インセンティブを与える。また、様々な分野の著名研究者が ELSI フェローに就任しており、研究グループや個人に指針や助言を与える。

ELSI では、異なる研究グループ間の闊達な議論を通じ、異分野融合研究を促進する。議論の場として、プリンストン高等研究所の学際研究プログラムを成功に導いた Piet Hut 教授を中心に、毎日のティータイムや、週 2 回のランチトーク、毎月の ALL ELSI ミーティング、ELSI アセンブリーでの研究発表など、幅広い異分野融合研究を促すような定期的なイベントを開催する。

(2) 事務部門

ELSI 事務部門の運営・管理は、事務部門長の櫻井隆が中心となり、事務部門長補佐と共に執り行う。櫻井隆事務部門長は、日本の国立天文台にて研究組織の運営・発展について豊富な経験を有している。東京工業大学の常勤職員が配置され、大学の既存の事務部門との交渉も行う。その他にも、高度な研究支援と英語能力を有するスタッフを配置する。

図 10 のとおり、本拠点では、愛媛大学、東京大学、プリンストン高等研究所、ハーバード大学にサテライトを置くこととする。また、ELSI の研究目標と密接に関連する、地球外の天体や深海熱水系の探査などの大規模な調査研究を展開している宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の宇宙科学研究所 (ISAS) や海洋研究開発機構 (JAMSTEC) と強固な連携・協力関係を築いている。この他、米国のジョン・テンブルトン財団の支援を受けた ELSI Origins Network (EON) プロジェクトが基盤とする 10 の海外研究機関とも提携している。EON プロジェクトで雇用したポスドクは、任期の半分を ELSI で、残りの半分を海外の研究機関で過ごす。このようなポスドクを通じた共同研究は、世界の研究交流ハブとなるという ELSI の使命の中で、極めて重要な役割を果たす。

<当初の構想との変更点>

- 研究体制を戦略的に強化した。生物学と化学を専門とする主任研究者を新たに任命した。また、東京大学に新たなサテライトを設置し、地球科学と惑星科学の研究体制の強化を図る。さらに、戦略的な発展目標を策定し、学際的な研究協力を促進するために、対話を主としたフォーラムを設けた。
- ジョン・テンブルトン財団からの巨額の研究資金の獲得により、ELSI Origins Network (EON) プロジェクトを開始した。これにより、ELSI の国際的なネットワークが拡大し、EON/ELSI は生命の起源の研究に取り組む多彩な若いタレントを魅きつけている。
- ELSI の発展を目指す上記の取り組みの中で、新しい研究分野を概念化した。来たる 5 年の間に、この「比較創発論」という考えを具体化させることを目指す。
- 若手研究者への体系的なフィードバックを確保するために、メンター制度を導入した。
- 大学院生の受入れを開始した。有望な大学院生をさらに積極的に獲得していく。

<ミッションステートメント及び/又は拠点のアイデンティティー>

※ WPI 拠点としてのミッションステートメント及び/又は拠点のアイデンティティーを、明確かつ簡潔に記載すること。

(1) ミッションステートメント

これまで、「生命の起源」については、生物化学的に「原始生命を形作る」という限られたフレームの中で議論がなされてきた。地球の環境は、「生命のゆりかご」と表されるが、これは生命と地球環境間の動的相互作用というよりは、生命の支えを意味するものである。

ELSI では、地球と生命の両方を等しく重視して研究を進め、「生命の起源」に関して徹底的に議論する。この理由として、生命の活動は周囲の環境とのエネルギーや物質のやり取りを通して成立していることが挙げられる。また、生命が生まれると直ちに生命の存在が地球の環境に影響を及ぼし、そして生命の影響を受けた地球の環境が生命に影響を及ぼすという双方向の相互作用により、生命の起源と初期地球環境は不可分と言える。このような我々の基本的な見解は、研究拠点の名称 (ELSI) にも反映されている。ELSI とは、地球 (Earth の E) と生命 (Life の L) を科学 (Science の S) する拠点 (Institute の I)、すなわち地球科学と生命科学を両立させ、研究を展開する拠点を意味する。

我々は生物学的な問いである「生命の起源」を、関連分野との融合を意識し、「持続可能な生態系の誕生」という問いかけへと置き換えることを考えている。我々は、研究のゴールを、地球史初期における、生命にとって厳しく過酷な環境変化に耐え、安定的かつ持続的な生命の存在を可能とした初期生態系の解明に置いている。

さらに、ELSI では、初期地球環境における生命を研究するとともに、地球自体がどのように形成され、そしてどのように変化したのかについて、地球表層にとどまらず、地球内部も研究対象とする。これらの研究過程で、生命を生み出した地球の普遍性と特異性を検証していく。これは、太陽系あるいは太陽系外の地球外生命探査に有益な示唆を与えることになるだろう。

ELSI は、最先端の実験と、コンピュータシミュレーション、野外観測を組み合わせることで研究を推進する。広範な異分野融合研究を通じ、代謝や自己複製について、より抽象的でメタレベルにある概念を開拓する

必要があるかもしれない。抽象的なモデルが実装された分子レベルでは、地球上の生命と地球外生命は異なる可能性もある。

(2)拠点の特徴

・NASAのAstrobiology Institute (NAI, 宇宙生物学研究所)の研究テーマは我々のものと似通っているが、ELSIは生命の起源とその進化全般における地球の役割に重きを置いている点で大きく異なる。最も重要なことは、ELSIがNAIのようなバーチャルな研究拠点ではないことである。異なる分野出身の研究者がELSIに集まり、トップレベルの異分野融合研究拠点を作り上げていく。サテライト機関であるプリンストン高等研究所の学際研究プログラムと同様に、ELSIでは定期的を開催するイベント等を通じ、研究所内のコミュニケーションを活性化させていく。

・ELSIの成功は、その研究環境と優秀な研究者のリクルートにかかっている。このため、多様なバックグラウンドを持つ世界トップクラスの研究者にとって魅力的な異分野融合研究プログラムを作り上げた。ELSIでは、研究者に対し初めから詳細な研究計画を要求しない。むしろ、世界トップクラスの研究者を招聘し、研究者自身のスキルや興味を加味してELSIにおける研究の最適化を図っていくことが望ましいと考える。研究所内での分野を超えたコミュニケーションの促進に加え、研究所長は最高の研究環境を提供することに責任を負う。また、スタッフの評価や研修を通じて、効率的かつ研究に重点を置いた秘書組織を確立する。

・ELSIはまた、コミュニケーション拠点という重要な役割を担う。国内外の多彩な研究者との分野横断的な結びつきを進めるとともに、研究成果をアウトリーチ活動や教育に積極的に活用していく。進行中の「はやぶさ2」ミッションや、計画中の火星衛星へのMMXミッションといった宇宙探査計画、地球の形成や生命誕生の謎、地球外生命などのトピックは、国民の関心が非常に高く、アウトリーチ活動の題材として最適である。教育に関しては、我々は留学生を含む優秀な学生を対象とする国際的な大学院教育プログラムを設置する予定である。このような活動はELSIだけではなく、ホスト機関たる東京工業大学の国内外における存在感を高めていくだろう。

1. 対象分野

- ※ 研究分野名を記載する。関連の深い分野のどのような融合領域であるかも明示。
- ※ 対象分野として取り組む重要性（当該分野における国内外の研究開発動向、我が国の優位性等）について記載すること。
- ※ 類似の分野を対象とする国内外の既存拠点があれば、列挙。

対象分野： 固体地球科学、惑星科学、地質学、環境微生物学、微生物ゲノム科学、システム化学、複雑系科学、比較創発論、およびこれらの融合分野

我々は、初期地球をキーワードに、太陽系における地球の形成と初期進化、初期地球の環境と生命の誕生、地球と生命の共進化につき、関連分野の融合研究を推進する。このような「地球学」を通して、生命を育む地球の普遍性と特殊性を明らかにし、地球外天体における生命の存在を科学的に検証する「生命惑星学」を創造する。そこから導かれる示唆を直ちに地球外生命の探査に活かすため宇宙探査・観測分野とも密接に連携する。地球・生命の両方についてしばしば指摘される「 $n = 1$ （標本サイズが1）」という問題を克服するにあたり、ELSIでは、地球と生命のそれぞれを構成する多数のサブシステムの中から新規性が創発する過程に共通する性質を理解すべく、物理学や生物学で用いられる広範な比較研究手法の応用を試みる。このように、創発現象を自然現象の一つとみなして、近代的比較研究手法を用いて創発現象を体系的に研究する学問を「比較創発論」と名付ける。

【対象分野の重要性と国内外の動向】

＜地球惑星科学と生命科学の融合＞

生命科学と地球科学は本来不可分のはずである。なぜなら生命の活動は、周囲の環境とのエネルギーや物質のやり取りを通して成立しているからである。我々は地球と生命の研究を再び融合し「なぜ我々生命は地球に存在し得るのか」を初期地球に焦点を絞った詳細な研究を通して探求する。これはギリシャ哲学にはじまる自然科学が現代に至るまで問い続けてきた最も重要な問題の一つである。つまり我々が解き明かそうとする対象の重要性については言を重ねる必要はなく、自然科学の2700年の歴史自体が証明するものである。そして現在、とりわけここ20年における関連分野の進展はめざましく、生命を宿す惑星・地球に対する認識は今、劇的に変わろうとしている。次にその動向を4つ挙げる。

1. 地球に関する理解

近年、地球最深部の解析が急速に進み、コア（地球中心核）を含めた地球内部の全体像がようやく見えるようになってきた。その大きな要因の1つが、研究所長・廣瀬と愛媛サテライト主任研究者・入船による、超高压実験技術の大幅な進歩である。15年前までは実験可能な条件は深さ2,000 km相当までに限られていたが、今では深さ6,371 kmの地球中心相当の条件における実験がルーチンで行われている。入船主任研究者の研究室では、大容量プレスによる高压実験をマントル深部に相当する条件で行うことができるようになり、この技術は廣瀬主任研究者の研究室の技術を強力に補完・サポートするものだ。このような発展により、廣瀬らはマントル最下部層がポストペロフスカイトという従来知られていなかった鉱物から成ることを発見した。さらに廣瀬らは地球中心に位置する内核の結晶構造を決定するまでに至った。これにより、今まで想像に過ぎなかった地球コアの実態は、ELSIの研究室において直接的に実験により再現・研究されるようになった。これらは日本発の大きな成果である。廣瀬・入船両主任研究者による高压実験の成果は、日本の最先端地球科学に対する世界の注目を集め、その重要性を高めるとともに、国際共同研究の機会が増え、地球の進化への理解が深まることにつながった。

過去の超高压実験の大部分は「現在の地球」を理解する目的で実施されたものだが、近年の技術進歩のおかげで、「地球の進化」と「初期の地球」を直接の研究対象とすることが可能となった。一例として、Hernlund 主任研究者と彼のチームは、ポストペロフスカイトの発見と地震探査データを組み合わせることで、コアが冷却する速度を制約することに成功し、これにより地球史46億年における進化とダイナミクスを議論できるようになった。コアの冷却速度はHernlund 主任研究者らによる「Basal Magma Ocean (基底マグマオーシャン)」仮説により極めて速いことが示唆されており、その後廣瀬らの実験により実証された。Helfrich 主任研究者は、最近、地震波データを用いてコアの最上部に層構造があることを明らかにした。この起源はコア・マントル間の化学反応であることが廣瀬・入船両主任研究者らの高压実験により明らかになっている。廣瀬主任研究者の研究室では最近、地球コアにおける二酸化ケイ素の結晶化という大発見があった。二酸化ケイ素がコアから結晶化することで磁場を生成できるため、35億年以上前から磁場が存在しているという古地磁気学による観測事実を説明可能とした。これと並行して当時の古地磁気研究がKirschvink 主任研究者らにより進められている。40億年以上前の残存磁場を記録する岩石そのものが存在しないため、代わりにジルコンという鉱物を用いその結晶ごとに磁場測定するマイクロ磁力計の技術開発に成功した。以上の研究に基づいて45億年前の地球形成初期における惑星進化を制約できるようになり、さらには井田主任研究者らが世界に先駆け提案した惑星形成モデルから制約される惑星進化とも組み合わせることができるようになった。以上より、地球形成初期のマグマオーシャンがもたらした大規模な分化はその後の地球内部進化を制御するだけでなく、さらには表層環境の変化にも影響を与えることが明らかになった。

一方、初期地球環境に関する地質学・地球化学の発展もめざましいものがある。その結果、マクロかつ長期的なタイムスケールにおいて、生命と地球が一体として共進化してきたことがいよいよ明らかになりつつある。1980年代にBill Schopfが主導したPrecambrian Paleontology Research Groupによって先カンブリア時代の地層に細胞の形態を残した化石が次々と発見され、初期地球にも生命活動があったことが明らかになった。しかし化石に残された単純な形態に基づいてバクテリアを分類することはほぼ不可能であり、この時点では「どのような生物が活動していたか」については不明なままであった。しかしその後、炭素を始めとする生体必須元素の安定同位体など、地球化学的な生物指標が確立したことで、特定の微生物代謝が地質記録から読み取られるようになり、今やC、N、S、Fe等の生物地球化学循環が太古代に遡って追跡可能なまでになった。さらにこれらの地球化学研究は、大気組成や海洋の酸化還元状態な

ど、初期地球の化学環境を定量的に推定するレベルに成長しつつある。これらの研究では、国内では熊澤や本拠点主任研究者・丸山が主導した全地球史解読計画が、1995 年以降先駆的な牽引役を果たした。その後、国際的には Agouron Institute における南アフリカカラハリ砂漠の掘削プロジェクトが始動し（主任研究者 Kirschvink）、NASA Astrobiology Institute やフランス・オーストラリアの陸上掘削計画が続いた。これらの地球史研究には、東京工業大学の COE 及び GCOE などの研究プログラムもその一翼を担ってきた。

こうした研究の結果、大酸化事変（Great Oxidation Event）などの大気組成変動や本拠点主任研究者の Kirschvink によって見出された全地球凍結（Snowball Earth）などの気候変動の詳細が明らかになり、環境の変化と生命の進化の関係性が暗に示された。こうした環境変動の原因は未だに分かっていないが、固体地球変動（急激な大陸の成長や堆積岩の増加、地球磁場の強度の変化）と酸素放出型光合成の進化、そして宇宙からの影響（地球への宇宙線の増加）の関連が盛んに議論されており、こうした新たな概念のうちのいくつかは東京工業大学 GCOE プログラムにおける学際研究の成果である。このような流れを受け、今や生命の誕生と進化を決定づける要因として、地球深部マントルやコアを含めた地球の熱進化と地球－生命系における長期的な変動との関係をクローズアップする時期に来ている。

2. 地球生物学と微生物比較ゲノミクス

微生物は極限的な物理的・化学的環境への適応において特に優れており、地球環境の多様性は、即ち地球上の生命に膨大な多様性をもたらすことにつながっている。さらに、極限環境下においても微生物が存在している事実は、多様な化学環境下で地球外生命が繁栄しうる、という考えの根拠にもなっている。しかしながら、物理的・化学的条件と微生物進化との関係については未解明な部分が多い。さらには、微生物に起因する地球の化学変化についても、時間的尺度や規模は未だ正確には解明されていない。生物的進化を地球の進化と結びつけることは ELSI の主要な目標であるが、科学界においても、両者の結びつきの重要性が認識されるにつれ「生物地球化学」や「地球微生物学」、さらにはより広範な「地球生物学」などの概念が確立された。

生命進化に十分な時間尺度における生物・非生物・地質の相互作用の包括的關係を解明するには、広範な学術分野とともにそれらを集約することが必要となるが、学術の広汎性は、ELSI のユニークな研究環境を通じて実現している。例えば、ELSI の研究者は微生物地球化学相互作用とその進化について、様々な角度から、そして別個でありながら統合可能な研究システムを用いて研究している。具体的には、超好熱ウイルス、古細菌・細菌の生体エネルギー論、酵素の進化と岩石記録に残されたその地質学的痕跡、光合成に代表される生体エネルギー機構の大きな変換の過程、微生物による生体鉱物形成経路、高度次世代ゲノムシーケンシング解析、そして、自然環境下での細胞活性を計測するための最先端の単一細胞解析技術、などである。

個々の細胞に立脚した新分野、細胞生態学、が確立された結果、ELSI のみならず世界的にも研究の焦点が転換している。今や何千もの個別の観察データから直接、微生物生態系に関する理解を組立てることが可能となったが、今後は情報源となる観察の件数は何百万に増加し、微生物生態系を構成する全ての個体の観察が可能になるであろう。これらの進展は、ゲノム上は同一の個体が、なぜ、どのようにして、集団内では互いに大きく異なっているのか、そしてこうした違いが地質学的に決定された物理化学的環境とどのように密接に関連しうるのかを解釈する一助となる。細胞の個性性に関するこのような視点を通じて、生物進化の過程で個性性が現在のような形で存在していなかった段階の「プロゲノート」に関する ELSI の他の研究との間で直接的な連繋と比較対照が可能となる。

個々の細胞から生態系を把握することを可能にすることに加えて、微生物ゲノム・メタゲノム科学は、初期および現代の生態系を理解し、生態系の形成や動態の高度な複雑性から一般原則を抽出する上での鍵となる。微生物のゲノムや生理の多様性については未知の部分依然として非常に大きいものの、次世代シーケンサーや配列データ解析手法の急速な発展によって膨大な量のデータと情報を取得、抽出、解釈することが可能になり、私たちの知識は空前のペースで拡大している。このようなアプローチを用いることで、光合成、水素酸化など生物学的エネルギー変換の進化に関する新たな視点を獲得することができる。こうした能力のおかげでゲノム科学は ELSI の重要な強みとして確かな地位を確立している。

3. 乱雑な化学：生命の構成要素の研究から生命起源のシステムとしての研究へ

人類は生命を精確に定義できる段階に未だ達していない。しかしそれでも、生物は単なる分子の集合体

ではなく、大規模で複雑な相互作用プロセスの動的ネットワークであるとの認識は共有されている。したがって生命の起源の探求においては、生命様のプロセスを維持できたと想定される前生物的に妥当な化学システムに注目する必要がある。現時点で Miller-Urey 実験 (Miller, 1953)、シアン化水素重合 (Matthews 及び Minard, 2006)、ホルモース反応 (Breslow, 1959) など、初期の地球環境条件を想定した多数の実験によって、複雑な化学システムが多数の反応メカニズムを引き起こし、無数の産物が産生されたことが示されている。そのようなシステムを ELSI では「乱雑な化学 (messy chemistry)」と呼ぶ。このようなシステムにおいて引き起こされる反応過程のうちで、生命の構成要素の供給源として従来想定されることが多かったアミノ酸、核酸塩基、および炭水化物などが合成される過程というのは、実はまったく支配的なものではない (それらは高収率で得られる生成物ではない) のである。事実、そこから得られる生成物のほとんどは、「タール」または「アスファルト」と呼ばれる、扱いづらく構造的に複雑な重合体の混合物である。こうした厄介な反応過程は、望ましい過程のみを選択的に進行させられる酵素が存在しない前生物的世界において、一体どのように抑制されたのだろうか。むしろ逆に、化学進化の過程においては「タール」が重要な役割を果たしたのであろうか。

地球環境と特定の地質学的現象が、前生物的な化学システムを形成したと考えられる。すべての合成化学システムにとって根本的に重要なのは自由エネルギーの源泉 (供給源) であり、想定可能なものとしては、電離放射線と湿潤-乾燥サイクルを組み合わせた自然天然原子炉間欠泉や、熱水噴出孔の煙突構造に組織された電気化学ポテンシャルなどが挙げられる。比較的最近調査され始めたこれらの自由エネルギーの源泉は各々が単体として作用した可能性もあるし、長年研究対象とされてきた混合非平衡流体の酸化還元ポテンシャルや、組織化分子を生成し地球に供給した可能性がある宇宙空間での非平衡化学などを含む、他の複数のエネルギー源と並行して作用した可能性もある。ELSI における自然環境モデリング研究では、冥王代 (既知の地層年代以前) における自然原子炉間欠泉の可能性に重点を置き、東京工業大学が有する放射線照射施設を活用するとともに、熱水噴出孔実験や実験モデルにより、前生物的地球環境に存在した可能性がある有機物を生成しうる二酸化炭素の還元反応に注目していく予定である。現行生物の代謝においては酸化還元反応が中心的役割を果たしている事実を鑑みて、この種の化学反応を実現しうる地質学的誘因の研究は特に重要である。

複雑系化学は比較的新しい分野であり、その基本理念は、前生物的に妥当であるかを制約条件として課されないまま、今も定式化の途上にある。ELSI の研究プログラムを主導するアプローチの 1 つは人工化学である。これは計算機を用いて化学反応をシミュレーションし、創発現象、自己組織化や進化一般に関する洞察を得ることを目的とする計算科学領域である。ELSI の研究は、計算機内シミュレーションと室内実験の両方において、分子間力による自己組織化や淘汰に重点的に取り組む。この枠組みの中での実験的研究は、必ずしも前生物的不是ではないが確立された分析技術によって識別可能な化学システムに重点を置く。

システム化学における ELSI の研究に並行的に貢献している重要な要素として、分子状態空間と反応系の両方の組合せ論を扱う計算方法の進歩が挙げられる。これらの進歩は過去 10 年間の計算能力の増大、ならびに反応を表現・分析するための抽象化の進歩によっても助けられている。SMILES や INCHI (Weininger 及び Weininger, 1989; IUPAC, 2016) のような抽象的な分子表示が広範に使用されるようになったことで、データベース方式による状況依存的な反応の表現が可能となったが、これらのシステムは同時に無限の拡張については不十分であるという分子表示の弱点を明らかにした。グラフやグラフ書き換え規則において、分子の表現と反応の抽象化が近年改良されたことに加え、グラフ同形性探索や整数線形計画法など高コストなアルゴリズムの計算が進歩したおかげで、10 年前だったらコスト的に不可能であったネットワークの自動生成や特性評価が可能となった。ELSI の研究員、協力者や提携先によって導入された新規ツールには、分子構造計算ツール MOLGEN (www.molgen.de/)、およびグラフ文法反応モデリングフレームワーク MedO[Datschger] がある (cheminf.imada.sdu.dk/mod/)。

分子および反応系を表現する個別の方法と並行して、分子動力学、密度汎関数理論、および第一原理法 (医薬品業界で大規模に使用されて発展した方法) の進歩によって、酵素・基質適合および反応遷移状態の定量的なモデル化が可能となり、実験結果に基づくキャリブレーションや、同位体効果、あるいは突然変異や原子置換の結果予測が可能となっている。これらを用いることにより、原始的酵素を再構築し、その進化に不可欠であった分子表現型の特性を推論することができる。

外部からエネルギーを供給されるシステムにおける秩序の創発の理解に関わる複雑系の手法の中には、非平衡確率過程からのパターン形成・ロバスト性に関する一般的な理論も含まれる。ELSI では上記の各種方法を、伝統的な反応拡散理論の問題（それらは今日も意義があり挑戦的な課題である）に加えて、Feinberg、Horn、Jackson の先駆的な研究（Horn 及び Jackson、1972 ; Feinberg、1987）に続く、化学反応ネットワークと呼ばれるトポロジ的にも計算論的にも複雑なシステムをはじめとする新しい領域にも適用する予定である。ELSI における複雑系研究に影響を与えている他の重要な要素としては、分子から生態系までの様々な階層における進化の動態についての完全に現代的な理解や認知能力の本質を抽象化しようとする理論が含まれる。特に後者については、アラヤ・ブレイン・イメージングのような革新的な研究センターと協働している。

乱雑な化学は、地球科学、複雑系物理学、有機化学・生化学の専門知識を組み合わせた学際的アプローチであり、ELSI は生命起源研究に乱雑な化学を適用するという点でユニークな位置を占めている。

4. 系外地球型惑星の相次ぐ発見

太陽系外の惑星（系外惑星）が初めて発見された 1995 年以来、見つかった惑星の数は飛躍的に増加しつつあり、2016 年時点で 3,500 個以上の系外惑星が確認されている。過去 10 年間に太陽系外で多数の地球型惑星（「スーパーアース—super-earths（大型地球型惑星）」と「アース—earths（地球サイズ惑星）」）が発見され、今や地球と同等規模の惑星であれば検出可能となっている。最近の観測や理論モデルでは太陽型恒星の 20%以上がハビタブルゾーン内にスーパーアース、またはアースを保有しているとされ、天文学分野における地球外生命の議論を喚起している。これら多様な、かつ遍在するスーパーアース・アースを研究することで、地球をより深く理解することができる。

ELSI では、太陽系内外を対象として惑星形成理論を展開している。ELSI は現在、惑星形成理論においては世界的な研究センターの一つとなっている。井田茂主任研究者は理論と系外惑星観測との直接比較を可能とする惑星集積モデルを開発したが、これは世界中で多数の系外惑星観測プロジェクトによって幅広く引用されている。惑星集積過程の N 体シミュレーションもまた ELSI の強みだ。現在では原始惑星系円盤・太陽系外惑星の天文観測データに加えて、宇宙化学データも理論シミュレーションに組み込まれている。

一方、過去の火星にあった水の痕跡の発見や、エウロパ（木星の衛星）とエンケラドス（土星の衛星）の内部海の存在を強く示唆する観測データは、太陽系内にも地球の他に生命を宿す天体があるのではないかと期待を抱かせる。氷衛星の形成・進化モデルも ELSI 研究者により集中的に研究されている。

このように、地球外天体に生命（の証拠）を発見できる可能性は高くなりつつある。現在または将来の観測技術で、地球外生命の存在の証拠の探索を開始することが可能である。太陽系外惑星が発する光を直接分光してスペクトルをとり、大気組成を探り、オゾンやメタンなどの生物起源の成分を検出しようというのが主なアイデアである。国際協力による次世代超大型地上望遠鏡計画（Thirty Meter Telescope: TMT、European Extremely Large Telescope: E-ELT）においても、このような分光観測は重点目標のひとつになっている。一方、国際的協力によって開発された ALMA（アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計）望遠鏡は既に観測を開始しており、星間分子雲において複雑な有機物を発見し、惑星が形成されつつある若い恒星を回る原始惑星系円盤の詳細な構造を明らかにしつつある。

地球外生命探査には、望遠鏡観測によるリモートセンシングに加えて、宇宙ミッションによる現場での分析やサンプルリターンの方向性もある。数多くの宇宙ミッションが火星表面の現場調査を目的としているが、JAXA（宇宙航空研究開発機構）による「はやぶさ-2」などのサンプルリターンミッションも有望視されている。はやぶさ-2 が採取する予定となっている原始 C 型小惑星（リュウグウ）のサンプルからは、水と有機物が見つかるはずである。JAXA はさらに 2024 年に打ち上げ予定の MMX（Martian Moons eXplorer: 火星衛星探査機）と呼ばれる、火星の衛星（フォボスまたはダイモス）へのサンプルリターンミッションも計画している。MMX が採取するサンプルには原始火星への初期の衝突によって生成された破片が含まれると考えられ、MMX は火星の衛星の起源だけでなく、原始火星表面の環境について重要な手がかりをもたらすものと期待されている。ELSI の研究者は MMX の科学目標の議論に参加しており、ELSI は MMX のミッション計画策定において重要な役割を果たすことが期待されている。

このように、地球外生命探査は科学をベースに動き始めており、10 年以内には分光観測によって太陽

系外の地球型惑星の大気が調査されるだろう。そのとき地球の普遍性と特殊性、さらには地球外天体における生命活動の有無に対する理解が劇的に進み、全く想像しなかった惑星を目にして、地球惑星科学は変革を遂げることであろう。このような観測のためには、生命の存在を可能にする惑星（または他の天体）の状態を予測する新分野を構築し、どのような観測が必要かを確定する必要がある。これは地球惑星科学と天文学の全体の流れの中でも急務であると言える。2015年に日本アストロバイオロジーセンター(ABC)が設立されたが、その主な目的はTMTに必要な観測装置を開発すると同時に、進行中の太陽系外惑星探査プログラムを推進することである。ELSIの研究者はABCの運営委員会のメンバーとして関与しており、ELSI・ABC間においては密接な協力が期待されている。

＜類似の既存研究拠点＞

海外拠点

- ・アメリカ航空宇宙局「宇宙生物学研究所 (NASA Astrobiology Institute, NAI)」
- ・SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence) 研究所
- ・ハーバード大学「生命起源イニシアチブ (Origins of Life Initiative)」
- ・マックス・プランク天文学研究所「ハイデルベルク・生命起源イニシアチブ (Heidelberg Initiative for the Origins of Life, HIFOL)」
- ・オスロ大学「地球進化・動態研究センター (Centre for Earth Evolution and Dynamics, CEED)」
- ・フランス国立科学研究センター「パリ地球物理研究所 (Institut de Physique du Globe de Paris, IPGP)」
- ・スペイン国立航空宇宙技術研究所「宇宙生物学研究センター (Centro de Astrobiología, CAB)」
- ・サイモンズ財団「生命起源共同研究計画 (Simons Collaboration on the Origins of Life, SCOL)」
- ・ジョージア工科大学「化学進化研究センター (Center for Chemical Evolution, CCE)」
- ・陸上掘削計画 (フランス・南ア・欧米)・海底掘削計画 (ODP ほか)

国内拠点

- ・海洋研究開発機構 (JAMSTEC)
- ・宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構 (ISAS/JAXA)
- ・自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター (ABC, NINS)

【拠点の優位性・魅力・持続性・将来性】

＜日本の優位性＞

本拠点で行われる研究は、①高圧実験と惑星形成理論によって「地球を作る」こと、②できた地球に「生命を作る」こと（生命起源学）、③「地球と生命と一緒に進化させる」こと（地球史解読）、さらに④これらを一般化し生命惑星の普遍性を解明すること、の4つに大別される。

このうち、高圧実験と惑星形成理論は、紛れもなく地球惑星科学分野における日本のお家芸である。高圧実験については、マルチアンビル装置とダイヤモンドセルの2つが高圧発生装置として広く用いられている。前者は1960年代に大阪大学の川井直人を中心に開発され、装置そのものと実験技術が日本から世界に輸出されてきた。現在でもその技術開発の最先端を走るのが、愛媛サテライトの主任研究者たる愛媛大学の入船である。後者は試料が極微小というデメリットがあるものの、近年の放射光施設の充実により、高圧地球科学の主力装置になりつつある。

研究所長・廣瀬らは、地球中心の超高圧・超高温環境を実験室内で再現できる世界で唯一のグループである。入船・廣瀬グループとも世界をリードする高圧実験技術をベースに、大きな成果を挙げ続けており、その優位性はこの先5年間、揺らぐことはないであろう。さらに、高圧下にある微小試料の解析には量子ビームの活用が不可欠である。日本は世界最大の放射光施設 SPring-8、大強度陽子加速器施設 J-PARC といった世界最先端の高圧試料解析施設に恵まれていることも大きな優位性の1つである。

一方、惑星形成論は、1980年代に構築された古典的標準モデルである「京都モデル」や「サフロノフ

モデル」に始まり、現在は本拠点主任研究者・井田らによるグループに引き継がれ、新しい「東工大モデル」が構築されつつある。この発展は大規模コンピュータシステムの開発と密接に結びついており、惑星形成の重層的な過程の統合的な理論を構築するものである。牧野 ELSI フェローを中心に、明確な科学的目標を設定することで、世界最速のスーパーコンピュータの開発にも多大な貢献を果たしてきた。これは、ハードウェア開発、計算アルゴリズム開発、ソフトウェア開発、サイエンス研究を一体として進める、世界に例を見ないユニークなアプローチで実現したものであり、今後も優位性が発揮できる。

1990 年代、本拠点主任研究者・丸山を中心に「全地球史解読」プロジェクトが推進された。これは NASA Astrobiology Institute が地球初期の生命史解読に乗り出すのに先んじて、地球初期の岩石記録の採取・解読・分析を全世界的に展開してきた。世界各地で採集された岩石試料は合計 16 万 5000 個にも及ぶ。これら膨大なコレクションは東京工業大学に保管され、世界中との共同研究に供せられている。固体地球変動をも視野に入れて岩石が採集されていることは、他のコレクションにない特徴である。

また、JAMSTEC が主導する深海熱水探査においても日本は世界と比肩する。高井 ELSI フェローらはこれまで、深海探査や深海掘削という世界的にも日本が最先端を走る大規模な研究設備をフル活用して、現在の地球上に存在するほぼすべてのタイプの深海熱水活動における地質－生命相互作用に関する膨大な定量的データを有している。

太陽系外惑星の観測及び宇宙における生命探査においては欧米にリードを許しているものの、日本は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) のはやぶさ・はやぶさ 2 による小惑星サンプルリターンミッションやすばる望遠鏡の系外惑星直接撮像など他国を凌ぐものが多々ある。JAXA は火星の衛星 (フォボスまたはデイモス) からのサンプルリターンミッションも計画中である。

個々の研究者の優位性に加え、「全地球史解読計画」「東工大 COE プロジェクト：地球」「東工大グローバル COE プロジェクト：地球から地球たちへ」などにより、既に 25 年前から始まっている地球科学者・惑星科学者・生命科学者の学際融合研究は、世界的にも日本のお家芸と目されている。

＜国際的な魅力＞

ELSI は設立後短期間で、研究者が集い、新しいアイデアを展開するための重要な場所となった。ELSI の国際的な魅力は、以下の 2 点に集約される。1) ELSI が探求するのは地球と生命の起源と進化と言う根源的な問いかけである。我々は地球科学・天文学と生命科学・化学に等しく重きを置いている。2) このような学際的研究を推進するというビジョンが、研究棟を有するリアルな研究所として具現化したのが ELSI である。国際共同研究拠点としての ELSI のユニークな特徴と世界的なステータスを詳述する。

近年、アストロバイオロジー (宇宙生物学) や太陽系外惑星観測、多様な極限環境における微生物生態系の調査などの、ELSI の研究目標に直接関連する分野が国際的に活性化している。しかしながら、地球 (惑星) の起源と生命の起源という地球・生命科学における最も野心的な問題への取り組みにおいて、ELSI に比類する研究機関はない。ELSI は学際的アプローチと精緻な協調的努力によって、設立後わずか数年間で非常に高い国際的プロフィールを達成することに成功した。

ELSI の国際的な魅力は、ELSI を中心とする国際的なプロジェクトへの他機関の関与にも明白に表れている。ELSI はその設立時に海外 2 拠点を含む 3 カ所のサテライトセンターや海外の多数の研究所との協力関係を築いた。この国際ネットワークは ELSI Origins Network (EON) プロジェクトを通じて大幅に強化された。EON プロジェクトは世界中の協力研究機関間のネットワークを構築しており、ELSI と各協力研究機関はポスドクを共有して、共同研究プロジェクトを推進している。米国のエモリー大学、ラトガース大学、カリフォルニア工科大学、カリフォルニア大学サンディエゴ校、NASA ゴダード宇宙科学研究所、NASA エイムズ研究センターやヨーロッパの南デンマーク大学、Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR、知的システム・ロボット工学研究所)、英国のケンブリッジ大学が協力研究機関に名を連ねている。

地球の起源、生命の誕生・進化という問題が、古今東西を通じた人類共通の関心事であることは言うまでもない。火星や内部海を持つとされる氷衛星 (エウロパやエンケラダス) に生命が存在するのではないかという可能性にも、大きな関心が寄せられている。近年では多数の太陽系外惑星が発見され、中には地球と似た海を持つ惑星も見つかりつつある。このように、宇宙における生命の存在が科学的に議論される時代にあって、生命を育んだ地球の成り立ちを理解する重要性は大きく高まっている。また、本拠点がフォーカスする「初期地球」は、ほぼ手つかずの領域である。物証がほとんどないことから、地質学・生命

科学にとっては大きなチャレンジとなる。しかし、初期の地球・初期の生命こそが、その後の進化を決定づけていることは明らかである。このような未知かつ重要な分野の国際研究拠点として、ELSI は世界から魅力ある研究所として映るに違いない。

ELSI が短期間に国際的なハブとして確立された理由として、ELSI が大学キャンパス内に研究施設を保有する実体のある研究所であるのに対して、類似する他研究拠点は異なる分野の研究者が各所属機関で別個に研究を行う、バーチャルな組織であることが挙げられる。ELSI では様々な分野の研究者が集い、交流している。このような、実際に顔をつきあわせて共同研究を行う環境こそが研究分野や文化の間の障壁を取り除き、学際融合を成功に導いているのである。その結果、生命の起源と進化において固体地球と宇宙が担ってきた役割は、重要な概念としてますます大きな注目を集めている。地球生命科学における「ELSI ブランド」はユニークで国際的な認知度を高めつつある。ELSI は先駆的研究拠点として、今後も幅広い関心を集めながら地球と生命の起源と進化に関する研究を発展させていくであろう。ELSI の次のフェーズでは、ELSI の国際的な注目度・魅力はさらに高まるに違いない。

2. 研究達成目標

- ※ 実施期間終了時の研究達成目標を一般国民にも分かり易い形で明確に設定。その際、環境領域において、異分野の融合によりどのような研究を実施していくのか、その上で、どのような科学技術上の世界的な課題の簡潔に挑戦するのか、またその実現により、将来、どのような社会的インパクトが期待できるのか、をできるだけ分かり易く簡潔に記載すること。
- ※ 上記目標を達成するための研究活動面の具体的計画を記載すること。

【研究目的】

本拠点は、生命誕生前後の初期地球にフォーカスし、(A) どうやって居住可能な地球ができたのか、(B) いつ、どこで、どのように地球生命系は誕生したのか、(C) その後、地球と生命が進化した要因は何か、を解明することを目的とする。これらの「地球学」により、生命を育む地球の普遍性と特殊性を明らかにする。また、その結果を活用し (D) 地球以外の天体における生命探査に指針を与える。なお、これらのテーマはいずれも異分野の学際融合により行われる。以下、それぞれについての詳細を述べる。

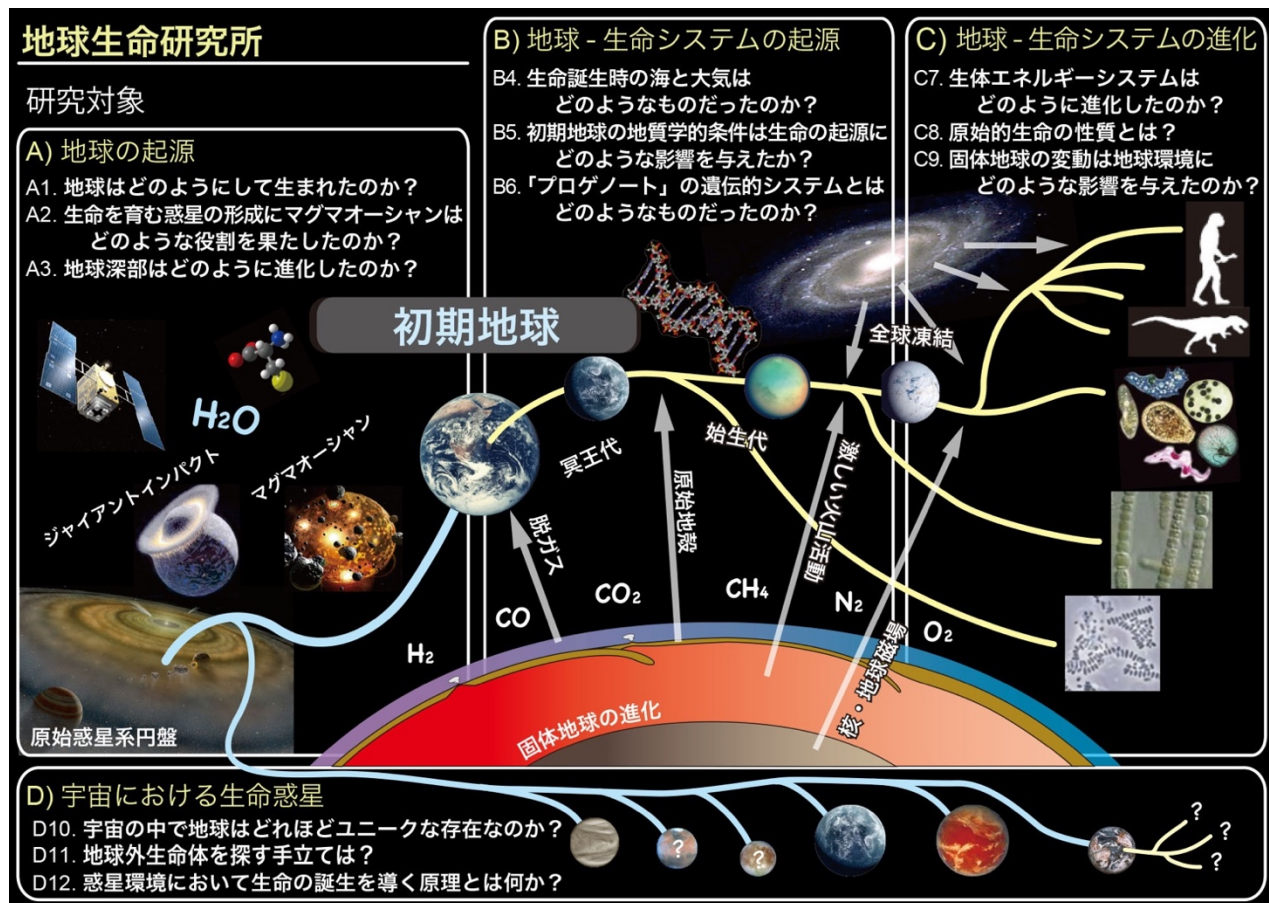


図 1. 研究概要

A) 地球の起源

「地球の起源」をテーマに、生命を育んだ地球という惑星の成り立ちを探る。「生命はいつどこで生まれ、どのように進化してきたのか」という人類の根源的な問いに答えるのにも、生命を育んだ環境、そしてその環境を決めた地球の成り立ちや変動を理解する必要がある。

初めに、(1) 太陽系内での地球の成り立ちを第一原理的な理論で理解し、その理論モデルを地球の化学組成という観点からチェックする。次に、(2) 従来のハビタブルゾーンに関する考え（単なる水の有無）から脱却し、地球における海水が適切な量となるに至った要因を突き止め、生命を育む惑星の普遍性を解明する。そして最後に、(3) 生命誕生前後における初期地球の物質分化を再現する。

A1. 地球はどのようにして生まれたのか？

古典的な標準惑星形成モデルは、太陽系における惑星の構成を説明するために、サフロノフ・モデル、ならびに京都モデルに基づいて 1970 年代～80 年代にかけて構築されたが、20 世紀末からの多様な太陽系外惑星系の発見によって、古典的なモデルが太陽系外惑星系に適用できないことが判明した。太陽系と多様な太陽系外惑星系の両方を整合的に説明することを目的として、惑星形成理論を再構築する上で、古典的モデルにおいて欠如していた多数のプロセスを考慮する必要がある。再構築後の惑星形成モデルに基づき、生命に不可欠な水や有機分子などの揮発性元素の地球型惑星への輸送についても検討する。従来、水が液体として存在することが生命の存在しうる惑星の条件とされ、その領域はハビタブルゾーンと呼ばれてきた。海と陸地が共に存在することも惑星に生命が出現するための条件となり得るが、惑星上の総水量を決定する要因はまだ解明されていない。さらに超高压実験をベースに、現在のコアと下部マントルの化学組成を決定することによって地球全体の化学組成を明らかにし、この理論モデルを検証する。

A2. 生命を育む惑星の形成にマグマオーシャンはどのような役割を果たしたのか？

地球型惑星や衛星は、活発な集積と広範囲に及ぶ融解現象を特徴とする「マグマオーシャン」と呼ばれ

る環境を経験し、惑星に集積した物質がマグマオーシャン中で分化し、コアやマントル、地殻、海洋、大気の形成が促進されたと考えられている。したがって、マグマオーシャンの研究は、地球型惑星や衛星の起源を理解するうえで極めて重要であり、惑星の形成（A1）とその後の進化（A3）に関する研究分野間をつなぐ重要な橋渡しの役目を担う。

A3. 地球内部の構造、化学組成やダイナミクスはどのように進化したのか？

マグマオーシャンの形成・固化に伴い、地球はコア・マントル・地殻・大気・海洋へと物質的に分化した。そのような地球初期の物質分化がその後の地球内部のダイナミクスや熱進化を決定づけ、火山活動・大陸成長・磁場形成を通じ、表層環境の変動と生命の進化に大きな影響を与えたはずである。大気などの表面条件は、地球深部で生成された地磁気場から潜在的に銀河構造までの幅広い要因に影響される。ELSI ではそのような物質分化を高圧実験とコンピュータシミュレーションで研究する。

B) 地球生命システムの起源

1977 年に Woese と Fox は、垂直遺伝がまだ情報伝達の支配的な形態となっていなかった生物進化の時期に言及して、「プロゲノート」という概念を提唱した。これによると、系統分類上明確に区別できる系統が出現する前には、遺伝的に相互に影響し合う生物群衆が存在し、そこから現在、生命の 3 ドメインとして認識されている各ドメインが出現した。これはすなわち、「生命の起源」と、我々の究極の直接祖先に繋がる最古の生態系の誕生とは別物として認識されるべき、という考えである。ELSI では、大気・海洋・岩石・生物群衆を含めた、最初の「地球-生命システム」に注目する。この共進化によりプロゲノート、さらには今日我々が知るところの生命へと至ったのである。我々のゴールはこの地球-生命システムがいつ、どこで、どのように構築されたのかに迫ることであり、そのため、ELSI では B4 から B6 に挙げる疑問の解決に挑む。

B4. 生命誕生時の海と大気はどのようなものだったのか？

生命が誕生した初期地球の大気・海洋はどのような組成だったか。冥王代の地球にはどのような特殊な岩石が分布していたのか。これらについて、1) 高温実験・理論計算によるフォワードアプローチ、2) 初期太古代の地質記録からの逆算と冥王代鉱物の解読に基づく実証的研究、の 2 つにより、検証可能なモデルを構築する。

B5. 初期地球の地質学的条件は、生命の起源にどのような影響を与えたのか？

生命の起源を解明することは複雑かつ多層的な取り組みであり、この問題の解決には地球物理的制約のもとで可能な、生命様のプロセスの出現を支える化学反応ネットワークの発見が必要である。このため、天然原子炉や熱水噴出孔がもたらす地質学的に持続して得られる電気化学ポテンシャルなど、天然に存在するエネルギー源によって引き起こされる化学反応を研究する。同時に、複雑系のダイナミクスや創発特性を理解するために、抽象化計算や人工化学の手法を用いる。また、構造よりも機能を重視して、前生物的条件下で妥当な不均一ポリマー集合が示す酵素的機能性について研究する。さらにトップダウンのアプローチによって、細胞構造の進化を研究する。

B6. 「プロゲノート」の遺伝的システムとはどのようなものだったのか？

ELSI の狙いは、古細菌、細菌、および真核生物の最後の共通祖先（LAABE。一般的には LUCA と呼ばれる）を突き止める、という目標をさらに超えたところにある。単純な前生物的化学物質の蓄積から、複雑かつ機能を持った大型分子が形成され、やがて生命はコミュニティとして誕生した。最初のコミュニティの遺伝子セットはどのようなものだったのか？これらの遺伝子はどのようにコミュニティメンバー間を「移動」したのか？持続・進化可能な生態系の構築を可能にした要因とは何か？さらに、20 種類のアミノ酸と対応する遺伝コードを利用できた初期環境はどこに存在していたのか？それはどのようにして生命システムになったのか？ELSI ではこれらの基本的な問題に対して実験的に取り組む。

ELSI は、生命誕生とは何か、という問題を見直すことによって、OOL（生命の起源）の分野をリードする。すなわち、生命誕生とは、ただ一つの事象ではなく、多数の事象により構成され、尚且つそこには惑星における多くの場所と種々の過程が関与していたと考えられる。我々は、生化学反応とは、細胞が誕

生した後の時代でのみ起きたものではなく、細胞誕生以前の地球化学進化の時代に既に始まり、それが複雑な有機物を産生、さらには部分的に選択し、その後の細胞の時代においても継続した、という前提を提起する。同様に細胞化とは、その構成要素を生成する段階と、それらを機能的なシステムへと組み合わせる段階とを含んでいた。

C) 地球生命システムの進化

生命誕生以来、地球の生物圏と地殻/大気/海洋システムはその構成・複雑さにおいて共進化してきた。この共進化の段階を理解し、最終的に再構築することを目指して、我々は地質学的記録の研究と同時に今日の生物圏における分子多様性の比較分析研究を推進する。特に、長期進化に伴う変化における、以下の3つの局面に取り組む。(1) 変化しつつある惑星上で、生物が生化学的・生理学的反応を持続するために行う生物学的エネルギー変換システムにおける主要な変遷。(2) 遺伝子構造と酵素機能の長期的変化について分子比較分析と合成生物学が明らかにできること、さらに祖先状態の再構成とその実験系の構築。(3) 熱進化による地球の長期的な経年変化と地球・生命の共進化によって地表の生命環境がどのように変化したか。

C7. 生物のエネルギー変換システムはどのように変遷し、地球と共に進化したのか？

冥王代から現在に至る生命の進化は多くの点で、エネルギーを放出する物理的プロセスとエネルギーを必要とする生化学的プロセスとを共役させる方法の進化であった。生命による主要なエネルギー代謝は化学合成（全地球と大気/海洋系との間の不均衡の利用）と光合成（化学変換と光の吸収・熱の放出との共役）の2種類である。始生代の生命は化学合成における質的革新を遂げることににより、以前にも増して多様、かつ極端な環境に定着し、生態系の複雑性を高めた。始生代に生命はまた、太陽光を利用して生合成化学と生理学反応を行う能力を進化させた。光合成における多くの革新（最新のものは酸素発生型光合成である）を経て始生代が終了し、原生代が始まった。その間地表の地質環境は完全に変化した。熱的進化による固体地球の変化（下記 C9 参照）が生物のエネルギー変換システムの変化を誘導し、その結果、地表環境の多くの性質が鉱物学的なものから炭素化学的なものへと変化し、これにより、その後の進化の性質も変化した。我々は始生代に起きた生物のエネルギー変換システムにおける革新について、その歴史的順序と地質学上・進化上の制約や原因を理解し、さらにこれらの要因がどのようにして地球上での生命の分化と繁栄を可能にしたかを理解することを狙いとしている。

C8. 原始的な酵素やゲノムはどのようなものだったのか？祖先型を再構築できるか？

生化学システムや生物のエネルギー変換システムは地球化学的変化と共に進化してきた（C7 参照）。これと並行して、2種類の重要な情報分子であるポリペプチドとポリヌクレオチドの機能もその形態・複雑性において変化してきた。同様の変化は、ゲノムや生態系の組織構成についても起きてきた。このような変化は現存生物が保有する分子配列の多様性として記録されており、確立された分子生物学的比較手法によって抽出できる。さらに、進化を支配してきた分子間相互作用の基本的メカニズムを理解するため最新のシングルセルゲノミクス解析および実験的手法を用いることで、より多くの知見が得られるようになる。我々は、祖先型の形質を推定することだけでなく、祖先型形質を持つ実験モデル生物を構築することを目指す。比較・機能解析と合成生物学的アプローチを組み合わせることにより、これを達成する。以下の課題に注力する。i) 炭素固定による独立栄養代謝経路の進化。これは生命の歴史のあらゆるステージで進化を支配してきた極めて重要な機能である。ii) 硫黄代謝とその関連酵素。これらの代謝に関わる触媒は、原始細胞の起源、現在のエネルギー代謝、そして地球の進化の3者を結びつける鍵となる。

C9. 固体地球の変動は地球生態系をどう変えたのか？

固体地球の変動は生物・大気・海洋の共進化にどのような駆動力を与えたのかを探る。特に初期地球内部の化学的成層構造の時間発展を対流シミュレーションから明らかにし、火成活動の活動度と大陸成長率を評価する。A3のコアに関する研究からコアの物性値を決定し、コアの対流と熱進化のシミュレーションも同時に行って、内核の誕生のタイミングと磁場強度変化を推定する。一方、地球史試料を用いて、古地磁気強度変化、大規模火山活動、大陸成長を解析し、シミュレーション結果を徹底的に検証する。これらの固体地球がもたらす表層環境変動を考慮し、真核生物誕生から後生動物への進化過程を解明する。

D) 宇宙における生命惑星

セクション A～C に共通するのは、様々な条件と歴史を持つ惑星上で、どこでどのように生命が発生するかを決定する生命の一般原理のひとつの例として、地球上の生命の歴史について理解しようとする姿勢である。普遍的な惑星学と普遍的な生物学の目的は一般化を行い、それを宇宙に遍在する惑星に適用して生命を宿する特性を明らかにすることにより地球外生命探査を主導し、さらに生命の起源の探索を通じて惑星の属性としての生命の本質についてより一般的に理解することである。

D10. 宇宙の中で地球はどれほどユニークな存在なのか？

上述の研究に加え、地球と他の地球型惑星（太陽系内、および可能な範囲で太陽系外）を比較することにより、地球の普遍性と特殊性のいずれも明らかにする。次なるステップは地球の性質に関する理解を一般化し、「惑星生物学」の確立に向けて一連の条件を構築することである。太陽系外惑星すべてを対象とし、どのような過程が系外惑星の特性の分布を生み出しているのかの理解を目指す「比較惑星学」に基づいて、「惑星生物学」を確立する。惑星生物学では、他の惑星における生命の有無、そしてどの惑星に生命が存在する可能性があるのかを予測することを目指す。

D11. 地球外生命は探す手だては？

上に挙げた A から C の研究成果を地球外天体（惑星、衛星及びその他の天体）の生命探査観測に活かすため、宇宙探査・観測分野とも密接に連携する。10 年後には、ハビタブルゾーンにある（地表に海を持つ）太陽系外の地球型惑星の大気のスเปクトル観測が可能になる。我々が明らかにする初期地球とその後の姿を比較対象として、系外惑星に生命存在を示す指標を確立する。進行中の宇宙探査計画であるはやぶさ 2 プロジェクトや将来の火星衛星探査計画（MMX）の科学的議論にも積極的に参加する。

D12. 惑星環境において生命の誕生を導く原理とは何か？

生命の起源の科学的意味と惑星システムの一部としての生物圏の役割を理解するためには、生体分子や細胞の起源に関するシナリオをはるかに超えたものが必要であり、それはどのシナリオが歴史的に正しいかを知っていたとしても変わらない。経験的な出来事（出来事）の歴史は生命のどの側面が偶然で、どれが不可欠であったかを区別することはなく、地球の生物圏がロバストであるかどうか、またロバストであった場合の理由について説明することはない。さらに生命システムを非生命システムと本質的に異なるものとしている重要な抽象的性質も特定しない。実際には、生命出現のシナリオの探索は非常に困難であり、強固な理論的枠組みがなければ、提案された仮説が有効である可能性は低くなる。そこで ELSI では、A1 から C9 までの実証的な分析とモデルに基づく分析とを十分に理解した上で、物理学、計算科学、あるいは生命科学における組織に関する理論を援用することにより、生命の起源に不可欠な抽象的特性を定義し、惑星系における生命出現の条件を定量的に提示することを ELSI は目指している。

【社会的インパクト】

我々の究極の目標は、科学の原点に立ち返って「我々はなぜここにいるのか？」を問い直すことであり、研究活動の結果が我々の地球観・生命観を変革し、また社会に対し思想的な影響を与えることは疑いない。人間が持つ知的好奇心、そして人間の本能たる知的欲求を呼び覚ますことで、科学立国日本の将来を担う若者を大いに刺激するだろう。

加えて、サブテーマ個々の研究計画は明確な科学目標を持ったうえで最先端の手法を独自に開発しつつ行われるものであり、その短期的な社会への波及効果は枚挙にいとまがない。例えば、超高圧超高温実験手法の物性計測技術の進展、大規模計算機の超高速化、化学進化実験をもとにした有機分子の設計・作成、これまで認識されなかった地球環境変動要因の特定、先端環境計測・解析・解読技術の革新、新規有用微生物の発見・開拓・利用、微生物遺伝情報の大量取得、膨大ゲノムデータ解析技術の発展、人間の知的欲求に駆動された宇宙探査技術の進展などをあげることが出来る。上記の本プログラムの主旨に比すると、これら短期的インパクトはあくまで副次的である。

【具体的研究計画と関連実績】

上記 A1 から D12 の疑問について学際的研究を通して解明すべく、以下に詳細な研究計画を示す。

A1. 地球はどのようにして生まれたのか？

ELSI では、原始惑星系円盤の形成・進化から最終段階の残存微惑星の衝突に至るまでの地球の形成を包括的に理解することを目標としている。N 体シミュレーションなどの第一原理シミュレーションを利用し、その結果を組み合わせ、太陽系外惑星の天文観測データと、太陽系の地球化学/宇宙化学データとの較正に基づく一般的な惑星形成モデルを構築する。

古典的モデルでは考慮されなかった重要な物理学的プロセスとして、原始惑星系円盤の進化、円盤ガスの付着成長、乱流円盤内におけるダスト粒子の成長から小石（ペブル）の形成/移動、ペブルの惑星への集積、惑星・円盤相互作用による惑星軌道の移動、潮汐軌道の進化、および軌道の不安定性を挙げることができる。古典的モデル後の 1990 年代以降に発展した原始惑星系円盤の観測が発展した。最近の ALMA 電波望遠鏡による観測は驚嘆すべき円盤の情報を示している。最近、高性能コンピュータを用いたシミュレーションによって乱流円盤の粒子成長の理解が進み、ペブル集積という考え方が提案されているが、これは古典的な微惑星集積と同様に重要である。惑星・円盤相互作用、恒星・惑星間潮汐相互作用および不安定性に起因する軌道進化の重要性は、多様な太陽系外惑星の発見によって注目を浴びている。一般的なモデルに基づく地球形成過程を議論する目的で、上記の各種新プロセスを組み込んだ一般惑星形成モデルを構築する。

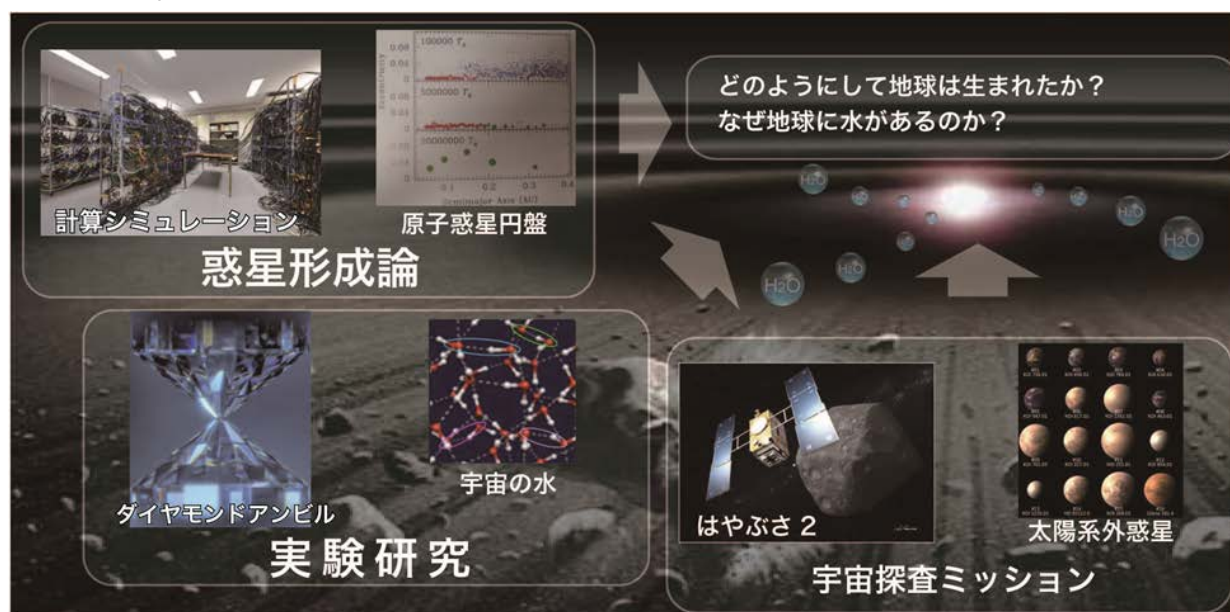
最近のコンピュータシミュレーションの発達により、地球形成後の地球に対する衝突の歴史をシミュレートすることができる。月を形成した巨大な衝突は地球の内部の攪拌、および初期の大気・海洋の進化をもたらす点で本質的に重要な出来事である。他方で巨大衝突の後の残存微惑星の衝突は、生命が出現したと考えられる初期地球の表面環境を推測する上で本質的に重要である。理論計算は地球化学データと対比できるに十分な精度を備えるようになってきた。コンピュータシミュレーションは今や、火星および小惑星帯の形成の歴史まで解明しようとしており、火星・小惑星帯に由来する隕石の宇宙化学データと比較することができる。ELSI は高性能コンピュータによるシミュレーションと地球化学/宇宙化学データを組み合わせて、力学的視点から地球の形成直後 5 億年の歴史を明らかにする。

地球の材料物質が形成された円盤領域の温度は、氷や有機分子など揮発性元素の凝縮をもたらす程には低くなかった。原始惑星系円盤において氷塵は、160~170K 以下の温度の 3AU を超えた領域でのみ円盤ガスから凝縮することが可能だ。ハビタブルゾーン内の惑星であっても、水分子や有機分子がないと生命を宿すことができない。ELSI では最新惑星形成モデルと高性能コンピュータシミュレーションを駆使して、地球をはじめとするハビタブルゾーン内の惑星にどのように水分子と有機分子が供給されるかを探る。地球への水の供給を説明する一つの仮説は、3AU を超えた遠隔地で形成された小惑星または彗星の偶発的な衝突であるが、衝突をおこす散乱は確率的におこるので、シミュレーションでは、供給された水の量は地球質量のゼロ%から数十重量%まで幅広く分散する結果となっている。海洋と土地の共存は惑星に生命が発生するための条件となり得る（地球の海洋質量は地球質量の 1/10000 重量%）。このメカニズムが水の供給の原因であった場合、生命の誕生は単なる偶然によって決定されることになる。このアイデアを再構築された一般的惑星形成モデルに基づいて再検討する。さらに原始水素大気とマグマオーシャンの相互作用による水の生成（Genda 及び Ikoma, 2008）、惑星形成における新しいペブル集積モデル（Sato, Okuzumi, Ida, 2016）など他の可能性についても検討したい。

氷衛星（エウロパまたはエンケラドス）の内部海は生命が存在する可能性のあるサイトの一つである。巨大ガス惑星の氷衛星は、星周原始惑星系円盤における惑星の形成と似た形で、周惑星円盤内で形成されると考えられている。氷衛星形成の標準的なモデルは全く確立されていない。ELSI ではさらに、新たな惑星形成モデルを応用して衛星形成の標準モデルを構築する。

実験的研究も重要である。原始地球の組成を解明する目的で地球の体積の 60% を占める下部 マントルの化学組成、ならびに金属コアの軽元素含量を特定することが重要だ。ELSI の地球化学/地球物理学的情報を用いた超高压実験によって地球の始原的な組成を決定する。金属コアの酸素、硫黄、ケイ素などの揮発性元素の存在度を制約することで、地球の材料物質を解明する。マントルとコアがどれくらいの水を保有しているかという点も、水供給プロセスを制約する上で重要である。海の総水量は地球の 0.02 重量% に過ぎないが、マントルとコアには海洋をはるかに上回る大量の水が含まれている可能性がある。これにより、原始太陽系形成過程のシミュレーションに対する重要な境界条件を与えることが可能となり、地球がどのようにして生まれたか、またその惑星形成過程における特異性と普遍性が明らかになると考えられる。

図 2. 太陽系における地球の形成は実験的研究の支援の下、コンピュータシミュレーションと惑星探査



からの情報を統合して考察される (A1 に関連)。

A2. 生命を育む惑星の形成にマグマオーシャンはどのような役割を果たしたのか？

マグマオーシャン研究分野を開拓するために、ELSI では、惑星形成論、大気モデリング、地球ダイナミクス、鉱物物理学、地球化学などの様々な分野出身の研究者を集めている。異分野出身の研究者間の共同研究へ向けた取り組みとして、多様な専門知識を必要とする課題についての研究活動を組織化しており、地球科学における最重要課題を解明するための、チーム編成を進めている。廣瀬、井田、Hernlund、Helfrich ら主任研究者がくさびとなって、惑星形成モデリングと初期惑星進化の間に学際連携を確立すべく努力している。

高压実験の結果に基づく進化モデルの構築

ELSI の数値モデリング専門家および高压実験専門家は、各々の専門分野の垣根を越え、共同研究を進めてきた。この専門家同士の連携で重要なのは、惑星を構成する物質の物理的・化学的特性についての信頼できる実験データが与えられることによって初めて、モデルにより精度の高い予測を行えるということである。モデリングには既存の実験データを使用することが可能な場合もあるが、研究の過程で新たな実験データが必要なことが明らかになることもある。このため、モデリング専門家と高压実験専門家の間で、生産的、かつ相乗効果を生むような研究上のフィードバックループの形成が期待される。マグマオーシャンの研究はまた、惑星形成モデリングと地球ダイナミクスモデリングとを結びつけ、惑星集積過程とその後の数十億年に及ぶ惑星の進化過程を統合的に理解する絶好の機会を提供する。

原始海洋と原始大気

マグマオーシャンは地球コアを形成する金属と原始大気の両方と平衡状態に達する。この原始大気が後に部分的に凝縮して最初の海洋を形成する (B4)。マグマは大量の水を容易に吸収することができるため、地球深部と地表環境との間での、地球初期にもたらされた揮発性物質の分配経路としてマグマオーシャンは機能する。さらに揮発性物質の存在は、マグマオーシャンの進化過程に対して強いフィードバックをも

たらず。そのため、揮発性物質が地球へ供給される時期とその量に、マグマオーシャンの進化過程は敏感に左右されうる。その進化過程の詳細を制約するため、我々が構築した原始地球への揮発性物質供給モデルを組み込んだ、新たなマグマオーシャンの進化モデルを作成する。このモデルから得られる結果に基づいて、高圧実験の新たな目標を設定し、モデルの検証を行い、マグマオーシャンの進化過程をさらに制約する。

原始地殻

集積過程の後期に続いて起こるマグマオーシャンの固化は地球の最初の固体表面を作り出した。この「原始地殻」は重要な研究ターゲットである。なぜなら、最初期の地球表層の化学環境は、原始地殻によってもたらされ、その化学環境は、生命を構成する元素を供給し、さらに初期代謝に使われるエネルギー源の供給を通じて起こりうる有機化学反応の種類を決定するためである（B4、B5）。あるいはまた、原始地殻が生命の発展を促すものではなく、その後の地質学的プロセスによって地殻が置換、または変化したことにより、地球上での生命の誕生が可能になったことを示す証拠を発見する可能性もある。原始地殻の化学組成の推定は、マグマ固化過程に関する流体力学モデルに、高圧実験によって得られる、結晶分化過程での元素の分配を示す岩石学データを組み込むことにより可能になる。

惑星の多様性についての理解

マグマオーシャンはいわば惑星の鋳造工場であり、太陽系内外の惑星に多様性をもたらす要因となっている。惑星サイズや軌道半径の分布などの天文観測から得られる一次データに基づき、太陽系外惑星の形態や生命が存在する可能性に関する予測を行う上で（D10、D11）、惑星形成の最初期についてより深く理解することは極めて重要である。高圧実験結果により制約された惑星集積・進化の時間発展モデルを用いることによって、マグマオーシャン期における進化史の結果として、異なる種類の惑星がどのように形成されるかを明らかにし、さらに、進化した状態についての予測を行うことを目指す。ELSIで行われるこのような基礎研究は将来の太陽系外惑星観測ミッションにおいて中心的存在として位置付けられることになる。なぜなら、それは惑星の形成と進化、そして現在の状態（直接観測することができるのは現在の状態のみ）の相互の関連性を扱うからである。この時宜にかなった貢献はELSIの存在意義を示し、今後数十年に渡って高い地位を維持するための先行投資とも言える。

A3. 地球内部の構造、化学組成やダイナミクスはどのように進化したのか？

下部マントルの化学組成の決定

地球全体の質量の6割を占める下部マントルの構造と化学組成は、地球全体の化学組成を知る上で重要である。ELSIの研究者は、上部マントルと化学組成が異なる下部マントルに、二酸化ケイ素の含有量が高い、粘土の高い領域（ブリッジマナイトを豊富に含む太古のマントル構造、略称：BEAMS）が存在する可能性を指摘している。今後5年間でBEAMSが実在する確かな証拠を発見する必要があり、さらに、高圧実験およびコンピュータシミュレーションに基づいて、このような化学組成的に異なる領域がどのように形成されたかを探究する。その結果、1) マグマオーシャンがどのように固化したか、そして2) 地球の材料物質の化学組成が判明することが期待される。

コアの化学組成の決定

固体地球科学においてコアの化学組成は最も重要な問題の一つである。ELSIでは、高圧実験やコンピュータシミュレーションにより、外核物質の候補であるいくつかの液体鉄合金の高圧高温下における縦波速度と密度を測定し、内部コア境界層における軽元素の分化や、初期地球におけるジャイアントインパクト時の溶融マントルからコアへ軽元素がどの程度溶け込んだのかを求める。これらの情報は、コア中の軽元素の同定に向けて重要な制約条件を与える。

コアの化学組成がわかれば、固体地球のバルク組成も明らかになる。その結果を難揮発性元素に関して、元素の宇宙存在度と比較し、惑星形成理論による地球形成のシナリオ（A1）との整合性を確認する。

マグマオーシャンの固化と原始地殻

実験により、原始地球における地球コアから原始地殻へと至る層構造を追究する。マグマオーシャンの固化を再現し、それを月が形成されたジャイアントインパクト当時にまで拡張する。マグマオーシャンの

固化は底部から始まったと考えられているが、最近の実験データや理論研究において、マグマは周辺の固体領域よりも密度が高く、そのため固化がマントル中央部から始まり、上方と下方のそれぞれへ広がったとする見解が出ている。これはマグマオーシャンの固化プロセスに対する理解を一変するものである。

マグマオーシャンの大規模な結晶化が終わった後の融け残りから成る原始地殻の化学組成は、生命に不可欠なリンをはじめとする、岩石学的に言う不適合元素に富んだものである可能性が高い。事実、カリウム、希土類元素、リンが豊富に含まれる KREEP と呼ばれる特異的な岩石が、月の地殻から見出されている。しかし、地球の地殻はこれとは異なっているだろう。

コアの進化と地球磁場強度の変化

地球コアの組成についてのより正確な理解を背景として、コアの熱的・動的進化を研究する。ELSI 研究者間の学際的協力によって、地球のコアがもっぱら二酸化ケイ素の結晶化によって組成を大きく変化させたことを最近明らかにした。ELSI らの研究グループの発見により地球コアの熱伝導率が高いことは分かっていたが、その対流は二酸化ケイ素の結晶化に伴う化学的浮力によって駆動されており、これが地球形成初期の時代から、地磁場を形成し維持してきた可能性がある。

同時に、地質学チームが大量に収集する先カンブリアン時代の岩石を用いて、古地磁気強度の変動を明らかにする。この計画には、主任研究者の Kirschvink が先カンブリアン時代の古地磁気強度のデータベースを改良するために開発した手法を導入し、併せて我々が推定する地球磁場強度の変動を検証する。巨大火成岩岩石区から得る多数の貫入岩体を採取し、ウラン/鉛 (U/Pb) 法による精確な年代測定を実施する。浅部の掘削サンプリングにより得られるサンプルは、古地球磁場強度決定に必要な改良テリ工法もしくはテリ工法に供することが可能と考えられる。また、超電導量子干渉素子を用いた磁気力顕微鏡技術は、冥王代の砕岩質粒子を対象とした解析に寄与する。これらの研究は C8 とリンクする。

地表状態と銀河環境の影響

固体地球の表面状態は、地磁気によって局所的に保護されたシステムである大気との境界面に制御されているが、同時に銀河環境のような巨大なスケールの力学の影響を受けている。宇宙が地球の表面環境へ及ぼす強制力（フォーシング）は（雲の形成に対する宇宙線の影響などを通じて）局所的な気象変化などの小規模変化をもたらす。宇宙フォーシングはまた、全地球凍結イベントのような大規模な変化の原因ともなり（Kataoka, 2013, 2014 ; Nimura, 2016）、地球の長期的進化に大きな影響を与えると指摘されている（Ebisuzaki, 2015）。銀河構造が大気へ及ぼす強制力（フォーシング）は（1）星形成率の大きな変化、（2）分子雲と太陽系の遭遇、（3）太陽系近傍での超新星爆発などを通じてもたらされると考えられている。牧野 ELSI フェローらが主導したシミュレーション技術の最近の進歩によって、天の川銀河の起源と進化を理論的に分析することが可能となり、一般的な見方とは大きく異なる見解をもたらした（Fujii, 2011 ; Baba, 2012, 2015, 2016）。従来、太陽系はほぼ静止した渦状腕に位置して銀河系内を円形運動しているものと仮定されていたが、これらのシミュレーションによると太陽は非円形運動しており、渦状腕も静止しているわけではない。この発見は星形成率や太陽系・分子雲間の相互作用の再検討を促すものである。また、これらのシミュレーションは、1 億 5000 万年を周期とした地球の気候変動サイクルと銀河系内の太陽系の位置との関連性も示唆する。

【関連するこれまでの研究実績】

ELSI でマグマオーシャンの固化とマントルの化学的成層構造、原始地殻の組成決定などを解明する準備は十分に整っている。上記のコアと下部マントルに関する研究は、超高压高温実験とコンピュータシミュレーションによる鉄合金及びシリケートの物性測定と計算が主となる。廣瀬グループはレーザー加熱式ダイヤモンドセルを用い超高压超高温実験で、コアの超高压（> 135 万気圧）と超高温（> 4,000 ケルビン）を同時に発生できる、現時点で世界唯一のグループである。さらに、静的な実験によって、地球中心（364 万気圧・約 6,000 ケルビン）を超える超高压超高温状態を発生した世界記録を持っている（Tateno, Hirose 他, 2010, Science）。

このような世界をリードする高压高温発生技術と放射光 X 線回折測定を組み合わせ、これまで大きな業績を挙げてきた。それらには、地球マントル最下部層の主要鉱物ポストペロフスカイトの発見（Murakami, Hirose 他, 2004, Science）、内核における鉄の結晶構造の決定（Tateno, Hirose 他, 2010, Science）、外核圧力における FeO の相転移の発見（Ozawa, Hirose 他, 2011, Science）、SiO₂ の cubic 構造相の

発見 (Kuwayama、Hirose 他、2005、Science) などが含まれる。さらに、電気伝導率や熱伝導率 (Ohta 他、2008、Science ; 2016、Nature)、地震波速度 (Murakami 他、2012、Nature)、元素分配 (Nomura 他、2011、Nature ; Hirose 他、Nature、印刷中) などの重要な物性についても、これまで高圧下での測定に向けたあらたな手法開発に取り組み、世界に先んずる画期的な成果を挙げてきた。

マントル深部物質の相転移や元素分配の精密決定に関しては愛媛大学サテライトの主任研究者・入舩による先駆的な研究がある (Irifune、1994、Nature ; Irifune 他、1998、Science ; Irifune 他、2010、Science ; Irifune 及び Isshiki、1998、Nature)。また、弾性波速度精密測定に関しても Irifune 他 (2008、Nature) による研究がある。

入舩主任研究者が率いるグループは、焼結ダイヤモンドアンビルを用いた下部マントル深部領域での相転移・状態方程式の精密決定を進めるとともに、超音波法を用いた弾性波速度測定法を世界で初めて下部マントル温度圧力領域に拡大した。さらに、Irifune 他 (2003、Nature) は、世界最硬ナノ多結晶ダイヤモンド (ヒメダイヤ) のマルチアンビル装置への応用も開始しており、マントル全域における精密実験を可能にしつつある。

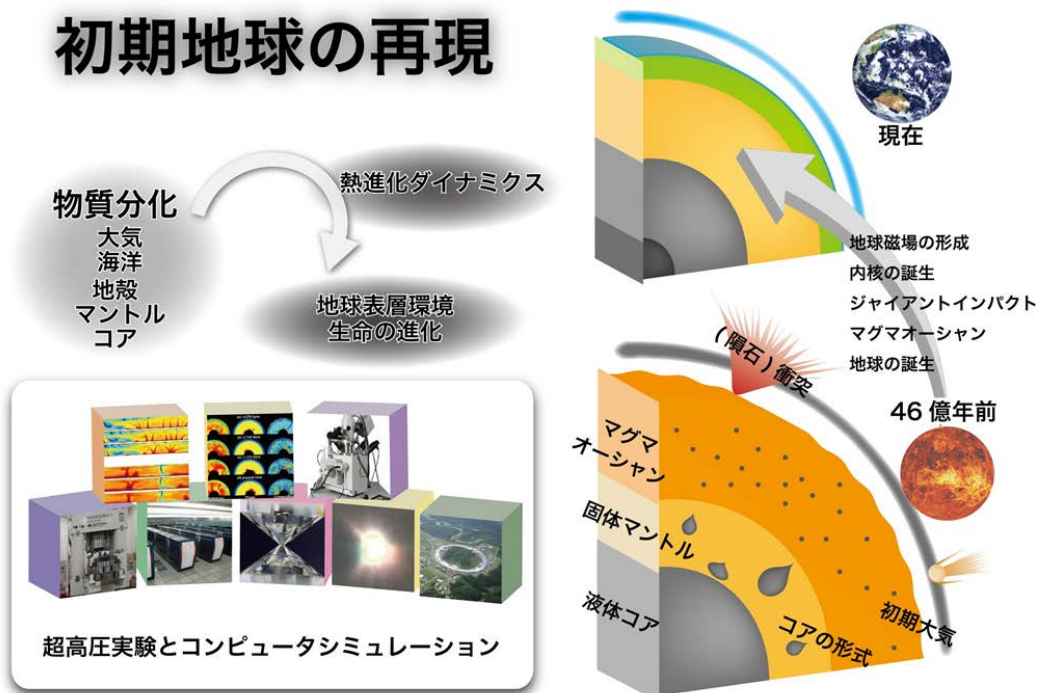


図 3. 地球のコアから大気へと至る化学成分の分化は、高圧/高温実験により再現される。そして、地球内部の化学的進化、熱的進化の研究へとつながる（研究テーマ A3 と関連）。

B4. 生命誕生時の海と大気はどのようなものだったのか？

まず A1～A3 の高温実験・理論計算を拡張して生命誕生時の大気・海洋組成をフォワードに推定する。この理論予測を物証に基づき徹底的に検証するため、初期太古代の地質記録からの逆算と冥王代鉱物の解読に基づく実証的研究を行い、初期大気海洋に対して検証可能なモデルを構築する。

1) 理論・実験フォワードアプローチ（冥王代）

生命が誕生した原始地球がどのような物理化学環境にあったかを突き止めることを目的とする。従来の標準的な理論モデルでは、微惑星から高温で脱ガスした揮発性成分（二次大気）が原始大気となったと考えられてきた。一般にこれは水蒸気と CO_2/N_2 を主とするもので、やがて表層が冷えて H_2O が液体すなわち原始海洋となり、 CO_2 に富む酸化的な原始大気が形成されたとされる。ところが、このような酸化大気下では生命誕生の前段階として必要な無機物的有機物合成と高分子化は極めて進行しにくい。近年、理論計算や地質学的証拠に基づき、地球の原始大気が $\text{H}_2/\text{CH}_4/\text{CO}$ に富む還元大気であった可能性も指摘されるようになった。マグマオーシャン後に降り注いだ隕石との反応による大気の改質について研究することも重要である。さらに我々の GCOE プログラムでの研究の結果、マグマオーシャン固結後の 1 億年には後期重爆撃事件より 10～100 倍量の隕石衝突があり、これが H_2 大気を形成した可能性も指摘されるに至った。これらの初期大気像は同時に地球の H_2O の起源を規定するため、海水の起源とその総量を知る上でも極めて重要である。

そこでまず、惑星形成研究（A1）の理論を拡張し、全球的な冥王代環境をフォワードに求めることを第一の目的とする。特にこれまで十分予測できなかった ①微惑星タイプ含水量の分布と ②マグマオーシャン後に衝突する物質の集積過程を見直し、その結果、脱ガスした成分としての初期大気海洋の組成及び質量を再考する。その際 A2 と A3 で追求するマグマオーシャン固結時の層構造を高温高圧実験に基づき復元する。これにより原始地殻の組成と量を決定する。これらの情報がマグマオーシャン固結時の最初期大気を規定する。

地球形成の後には火山活動によってマントルから供給されるガスが大気組成を左右する。このプロセスは従来、現在の陸上火山の研究例に基づいて行われてきた。しかし大陸がほとんど無く、海に覆われた初期地球ではむしろ高温の火山ガスではなく、岩石と海水の反応による海底熱水ガスが大気海洋系へのインプットとなっていたはずであり、その点を網羅的に追求した研究例は極めて乏しい。

そこで最初期の海洋地殻を想定した岩石種について熱水実験（水岩石反応）を行い、初期大気海洋へ供給したガス・元素フラックスを体系的に求める。既にその実験設備が高井フェロー・丸山主任研究者のグループによって整っており成果も挙げている（Yoshizaki 他、2010 など）。

2) 実証アプローチ（太古代）

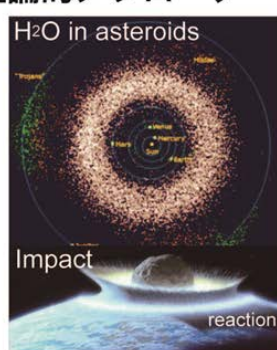
これら理論的・実験的研究は物証に基づいて徹底的に検証されるべきである。しかし冥王代（46～40 億年前）の地球環境は地質記録が存在しないために、検証のすべは極めて限られていた。ところが、地質記録の残る太古代（40～25 億年前）の地球表層環境についてはここ 10 年で劇的な研究の進展があり、冥王代の初期状態検証のすべを与えるレベルに成長しつつある。特に 1) 太古代海洋地殻の断片が次々と見出され、当時の海水による変質過程の詳細が研究されたことで海洋地殻への炭酸取り込みフラックスが定量化されるようになった（Nakamura 他、2004；Shibuya 他、2007、2012 など、ELSI 研究チーム）。また 2) 大気光化学反応で生じる同位体異常が太古代堆積岩に記録されていることが判明し、当時の大気酸素分圧が極めて低いことが明らかになると（Farquhar 他、2000）、さらにこの同位体分別過程・保存過程の研究が進み、温室効果ガス濃度や火山噴火による大気へのガス流量を定量化することも期待できるようになった（Lyons、2007；Danielache 他、2008；Ueno 他、2009、ELSI 研究チームメンバー）。

このような状況の下、太古代の海水及び大気組成の復元に焦点を絞り、岩石試料の系統的化学・同位体分析と分配・熱力学計算による海水復元を行う。これには東京工業大学が既に所蔵する多くの太古代海洋地殻資料を用いる。これまでは特定地域での詳細マッピングと変成作用の研究が主として行われ、定点情報が得られているが、これを大幅に拡張し、太古代を通じた時間変化を記述できるレベルまで網羅的に行う。その結果、変動原理についての理解が得られる。

また、大気プロキシとしての同位体異常に関する研究は、基本的な仕組みの解明が不十分なため、多くのデータが蓄積されているにも関わらず、その潜在能力を引き出せていない。そこで、分光実験・反応実験・数値実験を行い、同位体効果の波長・組成・温度依存性等を明らかにすることで、太古代の大気の実態を突き止める。主任研究者・吉田とそのグループは数多くの重要な段階を経て光化学的な同位体効果を決定し、この結果は地質学的に保たれている同位体異常を解析することによって太古代の大気のテストモデルを作成する。

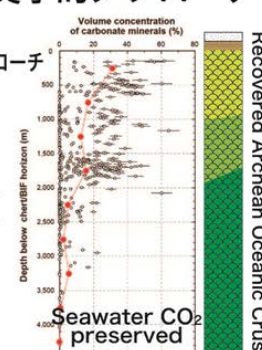
生命が誕生した時、地球大気や海洋はどのようなものだったのか？

・理論的アプローチ



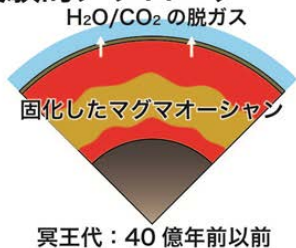
フォワードアプローチ
シミュレーション

・地質学的アプローチ



バックワードアプローチ
科学的証拠

・実験的アプローチ



冥王代：40 億年前以前



熱水作用によるガス供給
水・岩石反応

・地球化学的アプローチ



始生代：40 億年以降

図 4. 初期の大気・海洋の化学的特性は、惑星形成理論と地質学的記録を遡ることから決定される（テーマ B4 と関連）

B5. 初期地球の地質学的条件は、生命の起源にどのような影響を与えたのか？

地質現象は前生物化学にどのような影響を与えたのか？

2013年に開始された文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究の学際的研究プロジェクト「冥王代生命学の創成」を契機に、丸山茂徳主任研究者らは、かつての放射性漂砂鉱床が現在の原子炉に相当するような水と放射性鉱物との反応場を含む間欠泉システムを形成していた可能性を指摘し「天然原子炉間欠泉シナリオ」を提唱した（Maruyama 及び Ebisuzaki, 2016）。青野真士 ELSI フェローと Henderson Cleaves 准教授らは東京工業大学が有するガンマ線照射実験施設を利用し、放射線をエネルギー供給源とし天然原子炉間欠泉で起こり得た有機分子合成を再現する実験を行った。その結果、水-アセトニトリル混合物への放射線照射では生命構成分子（アミノ酸や核酸塩基ほか）の非生物的合成原料となる可能性が高いホルムアミドの生成が確認された。間欠泉シナリオに関連し、青野フェローらは密閉したフラスコ内で湿潤-乾燥サイクルを反復させる「間欠泉型リアクター」と呼ばれる実験装置を開発し、高温加熱と湿潤-乾燥サイクルによって触媒非存在下でアミノ酸の重合が起こることを実証した。さらに、ELSI では特に鉱物表面を用いた触媒存在下におけるアミノ酸重合の研究も行われている。パイライト（黄鉄鉱）などの鉱物存在下では重合反応に供するアミノ酸は鉱物上の特定の表面のみに吸着、凝集されると考えられる。原子力顕微鏡を用いてパイライト表面上のアミノ酸吸着分布を定量的に調べることで（Narangerel 他、2016）、前生物反応として妥当なペプチド形成のメカニズムを解明できると期待される。初期地球と初期生命を結びつける研究の柱として、「天然原子炉間欠泉シナリオ」に着想を得た放射線による分子合成反応研究、および鉱物表面で駆動される分子重合反応研究の更なる推進を図る。

乱雑な前生物化学は生命様プロセスを維持できるか？

原子炉間欠泉反応炉は、生命構成分子を合成し、生命様プロセスを維持しうる前生物化学反応ネットワークを開始・維持することができたかもしれない。同様のシステムの例として、ミラーとユーリーによる実験（Miller, 1953）、HCN 重合（Moser 他、1968）およびホルムアルデヒド重合（Cody 他、2011）は特に注目に値する。これらのシステムの多くは定性的に乱雑であるという共通点をもち、様々なメカニズムを通じて多岐にわたる化合物を生成する。対照的に、生命システムは酵素により制御され、精巧に組織化されたネットワークで構成されている。前生物学的な乱雑な化学（messy chemistry）から組織化された生物現象に類似するような反応ネットワークへの移行はどのようにして起こったのか。この問題に対するアプローチの一つとして、ELSI では Nathaniel Virgo が人工化学、すなわち抽象的な人工化学反応ネットワークおよびそこから創発する動的性質の研究に取り組んでいる。東京大学の池上高志教授との共同による Virgo の研究は、単純な化学反応が熱力学的に可逆的な条件下で自己組織化することにより複雑な自己触媒サイクルを形成し、結果としてネットワーク構造から触媒作用が発現することを示している（Virgo 他、2016）。分子間相互作用に基づく複雑な反応ネットワークの自己組織化について、実験科学および計算科学の両アプローチからの研究を推進する。乱雑な化学から形成された重合体は、化学進化において重要な役割を果たした可能性がある（例えば、酵素の前生物学的な模倣物）。現代の生命では、複雑な代謝ネットワークは酵素によって制御されている。酵素は生化学反応を触媒し、代謝経路を構築する複雑な生体高分子複合体であり、多くの場合、特異的に認識した基質を取り込み、配向させるための球状ポリマー部分と酵素活性の発現に大きく関与する低分子の補因子から構成される。さらに、酵素の球状構造は内部に空洞を有し、微小の制御環境を提供することにより、反応の進行を促進する。この球状構造を形成するのは、折り畳み構造をとったタンパク質や RNA 鎖である。このような精巧な複合体の合成は、推定される前生物学的条件下では困難である。我々は原始的酵素（protoenzyme）として、前生物学的に可能な「タール状態」の物質から派生する、タンパク質や RNA よりも単純なポリマーを支持体とする反応場の構造を検討している。特に Mamajanov 主任研究者は、高次に分岐することで球状構造を示す多分岐ポリマーに注目する。最新の研究成果は、第3級アミン含有多分岐ポリエステルの未精製混合物が、ケンブ脱離反応を促進する疎水性のくぼみ構造を形成する能力を持つことを示している。今後は多分岐ポリマーをもとにした擬似金属結合酵素も研究の対象とする。

熱水噴出孔における電気化学的プロセスは、「乱雑な化学」に制約をもたらしたのか？

初期地球上の熱水噴出孔は現在より活発であったと考えられており（Shibuya, Takai 他、2016）、そこで得られる地球電気化学ポテンシャル差が CO₂ の減少を促進し、生命の発生と初期進化に不可欠な有機化合物の形成に至った可能性がある（Kitadai 他、2016）。そこで我々は電気化学的に促進される CO₂ 減少をシミュレートし、地熱環境の反応エネルギー論的評価と触媒活性の推定に役立つ一連の実験装置を

設計した。高井 ELSI フェローらは深海熱水噴出孔の多様性と特性の発見に優れた業績を挙げており、さらに Shawn McGlynn 主任研究者、北台紀夫研究員、そして中村龍平主任研究者は新たに明らかにされたパラメータを用いて前生物的化学研究に取り組んでいる。これらの研究の成果は、化学進化の初期段階における地球化学から生化学プロセスへの移行に関連する化学的性質を明らかにし (Aono 他、2015)、さらに地球外生命探査を目的とする JAXA や NASA の宇宙探査の将来計画に有用な情報をもたらすことが期待される。実際、太陽系内の惑星や衛星の一部では、その表面上で熱水活動が起きていると考えられている (Kurokawa 他、2014)。

生命の出現において区画化が果たす役割とは？

区画化により特定の化学システムに出入りする化学物質の拡散が制限されると、前生物的化学反応の多様性は限定される。細胞という形式による区画化は、現在知られているような生命に必須の属性である。車 愈准教授が主導するプログラムは、原始細胞や誕生したばかりの生命における細胞、そして現在の細胞に関する理論的研究をもとに、細胞膜の形成とその後の進化を解明するという野心的な目標を定めている。脂質膜小胞は細胞の外膜として不可欠な存在であり、生命活動に必要な代謝や解糖系、DNA 複製、遺伝子発現、脂質合成、およびエネルギー生産はすべて小胞中で起こる必要がある。特に脂質合成は、細胞の自己複製を直接導く重要な過程である。Mercier、Kawai 他の研究 (2013、Cell) によれば、FtsZ リング形成のような細胞壁および細胞の分裂装置がなくても、脂質分子の継続的な過剰生合成のみで細胞分裂を引き起こすことが可能だとしている。このような分裂様式は L 型と呼ばれ、細胞が誕生した初期の段階で発生したと考えられている。構成論的アプローチによってこれを検証するために、我々は関係する酵素、基質および補因子を組み合わせることによって、脂質合成の代謝系の再構築を試みている。脂肪酸はリン脂質を構成する基本構造であり、8 種類の Fab (脂肪酸結合) 酵素と ACP (アシルキャリアタンパク質)、TesA によって合成される。これらの酵素はアセチル-CoA およびマロニル-CoA を利用して炭水素鎖を伸長させる。酵素の精製は完了しており、今後、人工細胞の脂質膜小胞の中で脂肪酸合成反応を誘導する計画である。脂質が合成されて膜上に供給された時に起こる人工細胞の形態学的変化を解析することによって、細胞性生命の最初期における細胞分裂の様式や、初期細胞がどのように今日の細胞の形態へと進化したかを明らかにする。

地球化学から生化学への移行は多面的な問題である。満足のいく回答に到達するためには、多くの数理科学分野の専門知識を融合させた学際研究プログラムが必要であり、これこそ ELSI がその強みを発揮する領域である。

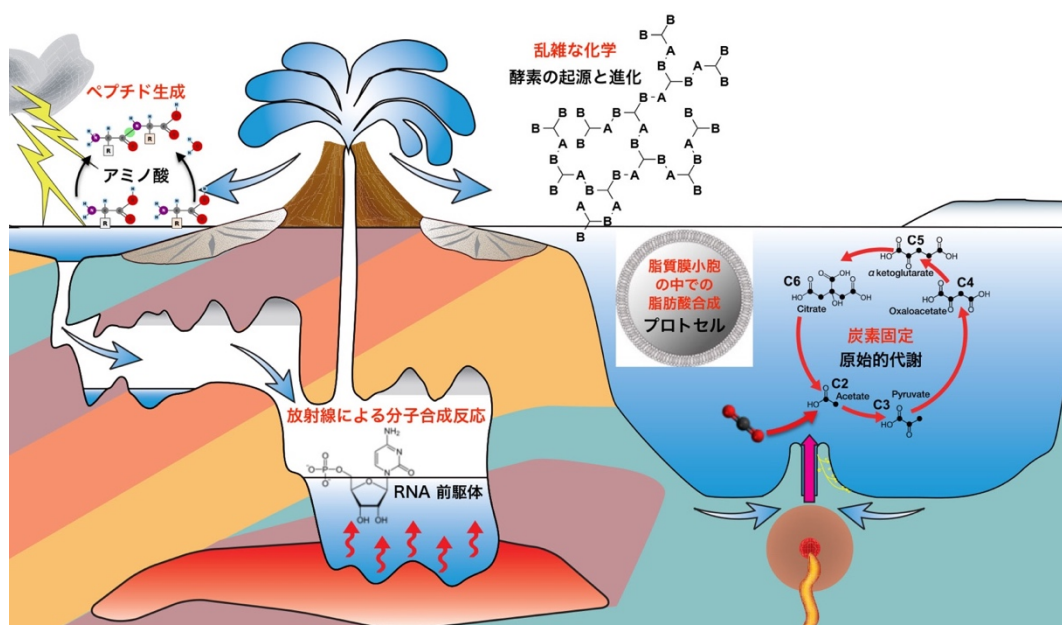


図 5. 地球化学により駆動される化学進化をテーマとして、単純な生命構成分子やポリマーの生成から大きな機能性超分子会合体の形成まで、幅広い研究に取り組む (テーマ B5 に関連)。

B6. 「プロゲノート」の遺伝的システムとはどのようなものだったのか？

絶滅することなく持続可能かつ安定的に生存するには、堅牢な生命システムが必要であった。太古の多くの、むしろほとんどの、生命システムは絶滅していった。偶然と選択により生き残った生命システムは、その結果として、環境のかく乱に対処できる細胞システムと生態系を獲得した。生命科学・生態学の分野では細胞システムの堅牢性について研究が進んでいるものの、系統的な大分岐が起きる以前の時代のコミュニティの堅牢性を考察した研究はほとんど行われておらず、我々はここに注目する。垂直遺伝に完全に依存することなく、持続可能、かつ進化可能な生態系を生み出すダイナミクスを解明し、今日の生命界の形成につながったゲノム多様化と生態系の形成過程を明らかにすることを目的とする。

ペプチド・核酸間の相互作用からどのようにして翻訳系が進化したか？

初期生命システムに関する重要な課題として、i) 最初のタンパク質合成に用いられたアミノ酸の種類、および ii) これらのアミノ酸がどのようにしてオリゴヌクレオチドに認識されるに至ったか、が挙げられる。上記研究目標 B4・B5 では、初期地球の化学的環境、ならびにこの環境と、最初の生物系の構成要素であったと考えられる低分子の形成・相互作用との関係を対象としている。B6 では、これらの分子がどのように自己参照的に相互作用し得たか、についてより深く掘り下げる。ポリマーは自己参照的な方法で作用する高い可能性を有しており、LAABE はペプチドとオリゴヌクレオチドに基づく 2 成分ポリマー系を利用していたと考えられる。そこで ELSI では、ハイスループットな組合せ方法を用い、異種ポリマー間相互作用を体系的に研究する。この目標に向けて、多数の条件下で実験を行うためのロボットを導入したほか、藤島、Virgo、Aubert-Kato 研究員らが研究を推進している。

脂質膜はプロゲノートによってどのように機能化されたか？

細胞性生物にとって膜の存在は必須であり、生命起源の研究者の多くは、細胞の誕生と膜構造形成能を直結させて解釈しようと試みてきた。一方、現在の細胞では総タンパク質の約 50% までが細胞膜に結合している、ということはしばしば忘れられがちである。これには膜の本質が反映されている。すなわち、膜とは境界であると同時に輸送経路でもあり、細胞膜内で、および細胞膜を介して選択的に起こるイオン・分子・電子の伝達過程そのものが、すなわち細胞が生きることを可能にしている。これらの知見を基として、車研究員が中心となって行っている実験では、脂質膜にタンパク質を挿入することにより機能化させる人工膜系の研究を進めている (Kuruma 他、2015)。すべての細胞は膜結合タンパク質を含んでいることから、この研究は、細胞の出現にまつわる生命起源の全ての理論にとって重要な実験的な道筋を築くものである。

プロゲノート・コミュニティのメンバーはどのようなエネルギー利用形態を用いていたか？

すべての生命体はエネルギーを用いて細胞中の物質を組織化し増加させる。現代の微生物学は、環境中の自然エネルギーが細胞の構築や複製に利用される形に変換される無数の過程を明らかにしてきた。一方、プロゲノート・コミュニティのメンバーが利用したエネルギーの種類やエネルギーの利用機序については、検証がほとんど進んでいない。初期の細胞生理学の研究を目的とする実験は、平衡に近づきつつある系で行われることが多く、生命体自体が開放系として機能し、環境から物質のみならずエネルギーも得るという観察は軽視されることが少なくない。実際には、生命は非平衡状態にあるのである。

では、生命システム系を稼働した最初のエネルギー源は何であったか？まず重要なのは、知られている全ての生命体は、酸化還元電位に沿った陰から陽への電子の流れによる電子伝達反応（酸化還元反応）を利用して生存している、という点である。ELSI では、現代生化学および微生物生理学の知識を用いて、最初に利用された電子の供与体と受容体の性質を研究対象とするが、なかでも H_2 、 S 、 CO_2 などを、酸化還元対として初期のエネルギー源でありえた可能性のある分子として考察する。早期の（かつ現在の）生命が地電流を動力源としていた（している）可能性についても研究対象とする。当然ながらこの実験方針は、ELSI における原始大気・海洋の性質に関する研究（B4）や、二種類のポリマー間の分子相互作用・フィードバック作用によって可能になる分子集合体に関する研究がもたらす情報に大きく依存する。

ELSI では最初の生物が化学浸透圧を利用していたか、あるいは基質レベルのリン酸化など他のエネルギー保存機構やチオエステル化などの代替手段に依存していたかを確立することに努める。地球、または他の惑星上におけるプロゲノート・コミュニティにおけるエネルギー収支や細胞単位での収率を予想し、これらのデータを ELSI が推定する初期の地球での期待値と比較することを目指す。

情報の垂直伝搬が確立する以前の病原体とはどのようなものだったのか？

コミュニティが機能する上で垂直方向の情報伝達が不可欠ではない世界では、あるメンバーが他のメンバーの寄生体になるという現象の定義は非常に不明瞭なものとなる。なぜなら、垂直伝達に基づく情報の流れへの束縛からの自由は、娘細胞の健全性が遺伝情報の保持のために必要とされないことを意味するからである。この興味深い状況はプロゲノートの時代においてのみ成立可能であったかもしれないが、それこそがプロゲノート・コミュニティの決定的な特徴であったかもしれない。そこで ELSI では、遺伝子の水平伝搬として今日知られている現象を介して、情報伝達が容易、かつ頻繁に起こり得る状況下での、「利己的な」遺伝子や細胞、そしてそれらの相互作用の性質を検証しようとしている。さらに生態系における配列維持の傾向に基づいて「絶滅」を定義し、垂直伝達を伴わない進化の性質を明らかにすることを狙いとしている。

プロゲノートの時代におけるウイルスの生態学的位置付けは？

Forterre はウイルスがオリゴヌクレオチド主導型の細胞プロセスの最初期の構成要素であった可能性を指摘している。この観点から見れば、RNA の進化は細胞・ウイルスの競合・補完関係という視点で最も適切に解釈することができる。他方でウイルスに関するすべての進化学的解釈を大きく制約しているのは、今日の生態系においてウイルスはその数において細胞性生物をはるかに凌駕しているにも関わらず、細胞性生物と比べてウイルスの調査数が大幅に不足しているという現実である。

端的に言えば、自然環境から単離された既知のウイルスの事例はあまりに少なく、その数少ない事例に基づいて考えるなら、ウイルスの多様性の探究の進展が非常に大きな驚きをもたらすであろうことは確実である。そこで ELSI では、ウイルス、ならびにウイルスと宿主生物との相互作用についての知識を向上させるという目的に特化した研究を追求している。望月研究員が主導する ELSI 研究グループがもたらした予備実験データは標準核酸塩基以外の塩基が利用されている可能性を示唆しており、さらに白馬八方温泉など様々な地熱環境で新奇ウイルスの探索が行われている。RNA ワールド仮説の弱点は、特に熱条件下での RNA ポリマーの化学的不安定性にある。RNA ウイルスを除いて現代の生物はすべてより安定した DNA を遺伝物質として使用している。現時点ではいずれの高熱環境からも RNA ウイルスは検出されていないが、好熱性 RNA ウイルスが存在する可能性を、現在探索中である。

個体という視点からの微生物生態学

垂直遺伝が支配的である現在の生物相と比べて垂直遺伝が起こる規模が小さいプロゲノートについて考察する際、個体という進化的概念は曖昧なものとなる。プロゲノートが細胞で構成されていたとして、これらの細胞が DNA を複製により垂直方向に伝搬するのでなく、水平方向に交換していたとすると、コミュニティメンバー間に存在しえたと考えられる代謝上のつながりはどのようなものであったか？我々はこの質問に取り組むため、細胞集団全体を対象として、細胞活動を一つ一つの細胞レベルで可視化し、差別化できる分析技術を使い始めた。McGlynn 主任研究者は複雑な堆積物基質中の 5,000 以上の系統的に同定された個体細胞の解析をすでに行っており (McGlynn 他、Nature、2015)、この技術はこれまで均質であると考えられていた集団内に未曾有の多様性があることや (Kopf、McGlynn 他、2015)、種間での直接的な電子伝達による細胞間相互作用の新規メカニズムの存在 (Scheller、McGlynn 他、Science、2016) を明らかにしている。現在 ELSI ではこれらの最先端技術を活用して、今日存在する細胞コミュニティ内の相互作用に対する理解を深めようとしている。これはこの種のデータとしては最初のものであり、プロゲノートの段階における細胞間相互作用の種類を考察し、仮説化するための基盤をなす。

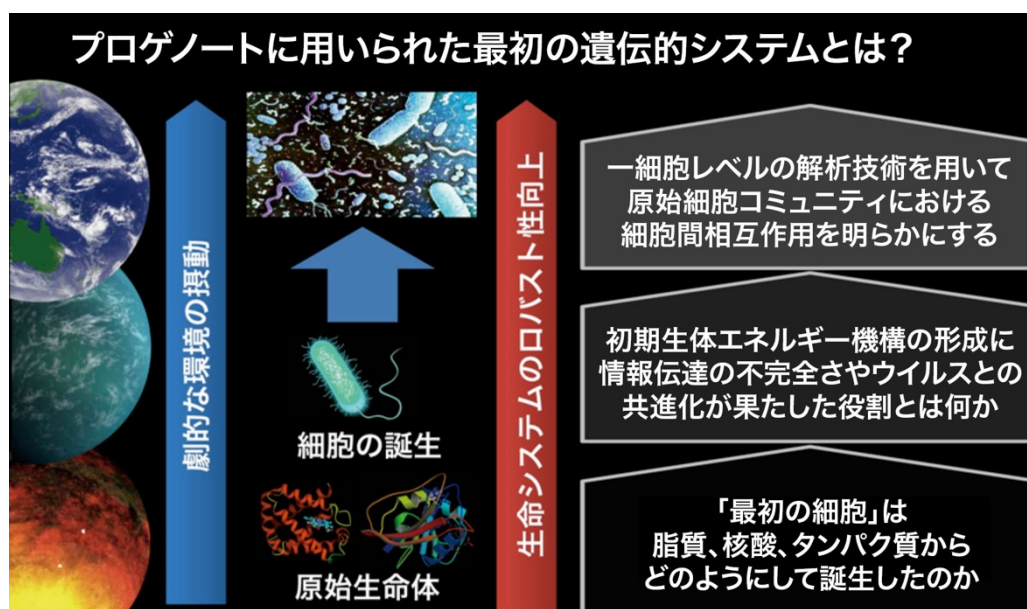


図 6. 地球化学現象により（前）生物学的変換過程が媒介された時期と、古細菌、細菌、および真核生物の最後の共通祖先が生息した時期との間に、プロゲノートが存在したとされている時期がある(Woese、1977)。ELSI は実験的なアプローチでプロゲノートを研究する最先端の研究センターとなっている（研究テーマ B6 に関連）。

C7. 生物のエネルギー変換システムはどのように変遷し、地球と共に進化したのか？

我々の研究方法は広範な分子系統学や微生物における主要炭素・エネルギー代謝経路の生物学と、地質記録の高解像度解読とを融合させて、大気・海洋システムの変化を背景とした化学合成の主要な進化的変遷や、光合成の成立という革新的イベントについて解明することである。以下の課題に取り組む：

- 独立栄養炭素固定経路の多様化や最適化を推進した生物学的・環境的要因は何であったか。
- 炭素固定経路における生体エネルギーの初期の革新は、電気化学ポテンシャルの生成などの地質学的プロセスに直接依存していたか？
- 生化学経路における逆転現象は独立に何度も起きている。これには複雑な生物のエネルギー変換システムの変化が必要だったのか。生物はこのような複雑さをどのように実現するのか。

これらは McGlynn、中村両主任研究者の主な研究目標である。さらに、以下の課題にも取り組む。

- 酸素発生型光合成の進化というエネルギー革新をもたらした地質学的・生化学的背景とは何か。
- 大気はいつ、どのように酸化されたのか。
- 真核生物の誕生は酸素上昇の結果だったのか。全球凍結現象は決定的な役割を果たしたのか？

これらについて、Kirschvink 主任研究者らは、地質学および地球化学的制約を与えることを目指す。

独立栄養炭素固定のための生物エネルギーシステム、および地質電気化学との関連の可能性

最古の炭素固定経路の 1 つは、Wood-Ljungdahl 経路として知られている補因子上の一炭素単位を直接還元するための経路である。これは古細菌ドメインの系統樹上で深く分枝しているメタン菌や、細菌ドメインに属する酢酸菌に存在し、最初の炭素固定経路であったと示唆されている。しかし、これらの 2 系統で利用される生体エネルギーシステムはその構造が著しく異なっており、それぞれがこれらの生物が生息する低エネルギー環境において高度に最適化されている。我々は炭素固定の起源を理解するための道筋として、これらの経路がどのように分岐したのか、その誕生はどのような先行生体エネルギーシステムにより実現されたのかを理解することを目標としている。特にそのような経路が、今日の生物よりも低レベルのエネルギー最適化のもとで機能した可能性があるか、異なる地球化学的エネルギー源によって補強された可能性があるかという点に重点を置く。

とりわけ関心の対象となっているのは、新任の中村龍平主任研究者（2017 年 4 月 ELSI 入所）、高井研フェロー（ELSI）、山本正浩博士（JAMSTEC）による最近の発見である。これによると、酢酸菌やメタン菌が生息することが知られている熱水環境で、噴出する熱水と海水の間に位置する熱水噴出孔（チムニ

一)の壁全体にわたって、生命を支えるうえで十分な大きさの電気化学ポテンシャルが供給されることが直接証明された。中村研究室や北台紀夫 ELSI 研究員による多数の実験によって、Wood-Ljungdahl 経路に類似した一炭素還元が、熱水噴出孔で得られる程度の電気化学ポテンシャルによって直接駆動されることが示されている。このような地球化学環境が、酢酸菌やメタン菌によって利用される生体エネルギーシステムの独立的進化や漸次的変化をもたらしたか、そして直接的な電気化学ポテンシャルを炭素固定のための絶対的な生体エネルギーシステムとして利用する現生生物は存在するのかを探求する。

生化学における「大いなる逆転」：生体エネルギーの観点では、どのように達成されたのか

メタン生成や酢酸生成における Wood-Ljungdahl 経路は二酸化炭素からの炭素固定に利用されるだけでなく、逆転すれば嫌氣的メタン酸化 (ANME) などの還元炭素源からの様々な炭素摂取の基盤となる。この関係はおそらく生化学的に発生した最古の「大いなる逆転」の一つと見られており、McGlynn 主任研究者が主要な研究対象として、鎌形フェローと協力して取り組む。もう一つの逆転は、先行してしたと考えられる還元的クエン酸回路から、より新しい酸化的クエン酸回路 (またはクレブス回路) への炭素固定経路における逆転である。酸化的、あるいは還元的に働くかによって、これらの経路におけるエネルギー授受と生化学反応の共役には大きな違いがあるが、この相違の成立にはさほど多くの新しい分子やメカニズムは必要ではない。むしろ、小規模な分子レベルでの革新およびゲノム再構築が広範な代謝変化に至ったのではないかとこの見解が示されている。

進化の過程では、真に革新的な分子化学やエネルギーの導入事例もある。例えば、酸素分子と光の利用をめぐるのは、大規模なゲノムレベルでの改変と進化が起こった。上記のような「可逆的」エネルギー代謝の研究に加えて、我々はまた、酸素分子を用いるような高ポテンシャル (酸化) 代謝の決定因子や進化の歴史を理解することを狙いとしている。地球の進化を通じた長い時間スケールで、さらに生命の誕生前後の短い時間スケールで、代謝、進化、および地球に関する可変要素がどのように相互作用し、新たな化学を確立したのかを探求する。

地球上の酸素レベル上昇の原因と結果

酸素発生型光合成は、化学合成に由来するすでに高度に複雑化していたシステムの上に成立した。少なくとも 2 つの光化学系の反応中心が存在しており (これらは嫌氣的性の緑色硫黄細菌および紅色細菌に別々に保存されている)、クロロフィル生成における主要なステップはすでに存在していた。鍵となる炭素固定酵素である RuBisCO の起源はグループ IV と呼ばれる外群にあると見られ、炭酸脱水酵素のような補助的タンパク質はメタン菌などの原始的な生物では他の機能を果たしていた。我々は酸素レベルの上昇という問題に生物学の視点からアプローチする。すなわち、酵素の祖先型を再構成し、それを同位体分別比の測定と結びつけて研究する。このテーマを主導する Kacar 准主任研究者 (ハーバード大学サテライト) は、タンパク質のバイオインフォマティクスとゲノム解析を地球化学の手法やデータに結びつけるという、全く新しい研究連携に取り組んでいる。これら 2 分野の融合によって、酵素の進化 (生物学的触媒の進化において、反応の特異性と速度のどちらがより重要か?)、ならびに古代堆積物における同位体の濃縮や枯渇の解釈についての洞察がもたらされるものと期待される。

化学合成から光合成への推移は始生代の地質記録に刻まれているはずである。最近の安定同位体地球化学の発展によって、先カンブリア時代の岩石の同位体情報から、嫌氣的代謝 (例えばメタン生成および硫酸塩還元) の活性を評価することが可能となっている。吉田主任研究者のグループ、大河内、上野の研究によって、岩石試料から特定の代謝活動を追跡する目的で新しい同位体技術を開発している (例えば Ueno 他、2006、2008 ; Ohkouchi 他、2007)。さらに、嫌氣的光合成に関する情報を入手しており、嫌氣的生物の主要な代謝についても反応センターを生成する特定の生化学反応に基づき記述している (ELSI 塚谷研究員が主導する研究による)。また高井フェローのグループは、窒素循環の中で窒素固定について、地質記録を用いた分析調査を行っている (Nishizawa、Takai 他、2014)。

我々は計画の前半でアナログ環境・培養実験による生物代謝プロキシの新規開拓を行った。計画の後半では地球史試料の同位体 (H、C、N、O、S、Fe) の系統的な解析を行う。我々が研究対象とする環境は、酸素発生以前の鉄代謝を検討する上で重要な高濃度の還元鉄を含む嫌氣的な温泉にまで拡大した。従来、これらの研究で障害となってきたのは後代のオーバープリントや汚染であり、また他方、汚染の影響が無いはずの堆積物中炭質巨大分子 (ケロジェン) からはその情報が取り出せないという技術的な問題があった。後者を解決するにあたっては技術の進歩が鍵であるため、特に有機窒素・水素・硫黄に着目した新た

な有機地球化学的抽出法を確立していく。その結果、化学合成から光合成への微生物圏進化を物証に基づいて明らかにする（例えば Johnson、Kirschvink 他、2013）。ELSI の研究目標は、光合成の起源においてどの要素が地球物理的起源のものであり、進化のボトルネックであったかを解明し、これらの疑問のどこまでを地質記録に保存された証拠から解明することができるかを判定することである。さらに C9 では、同位体・化石証拠に基づいて、酸素レベルの上昇と、真核生物や多細胞動物の起源の詳細なタイミングを考察する。

地球大気にはなぜ酸素が存在するのか？

1) システム生物進化学的アプローチ

化学合成から酸素発生型光合成へのエネルギー革命はいかに進んだか？

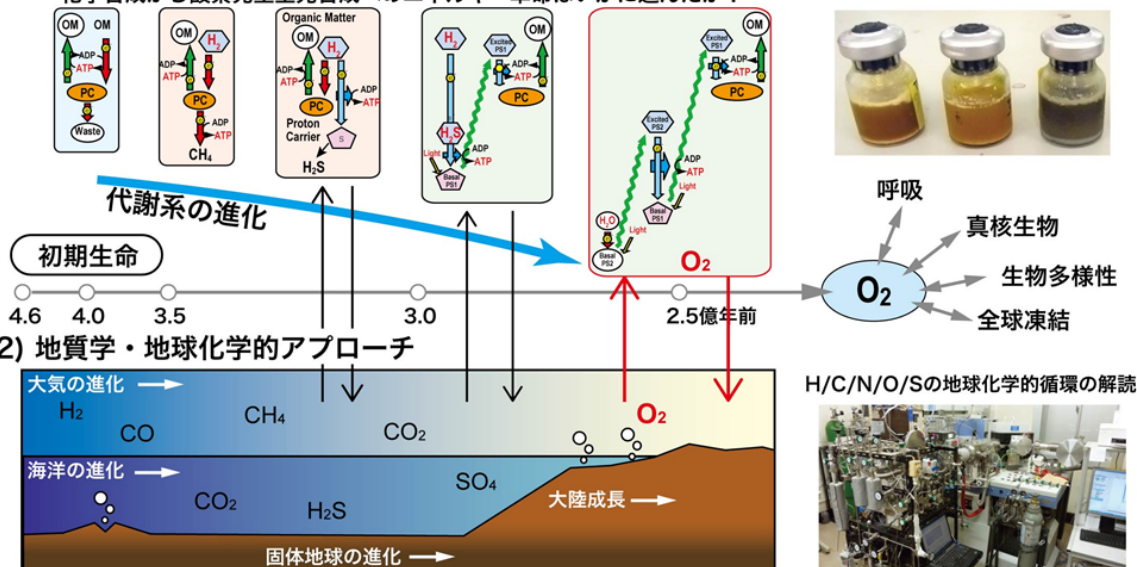


図 7. 生体エネルギーシステムにおける劇的な変遷は何によって引き起こされるのか。このような変化を惑星スケールの視点から正確に解釈するのに何が必要か。生化学、同位体科学、地球化学を統合し、過去から現在に至るこれらの相互関係を明らかにする。

C8. 原始的な酵素やゲノムはどのようなものだったのか？祖先型を再構築できるか？

分子の複雑さと祖先型の復元に関して、以下の 2 つの領域を重点的に研究する。まず、「古酵素学」(paleoenzymology ; Benner 他、2007 ; Perez -Jimenez 他、2011) によるアプローチである。今日地球上に存在するいかなるタンパク質配列よりも原始的な種類のタンパク質配列を復元するために、比較分子系統分類学、微生物培養、そして実験的・計算科学的タンパク質生化学手法を用いる。研究の対象として炭素固定経路における酵素に重点を置く。第二の重点研究領域では次世代の進化研究である「分子システム進化生物学 (molecular systems evolutionary biology)」の創生を目指す。ここでは、再構築した祖先的分子から機能的なシステム、すなわち真に原始的な形質を持つ細胞を作るために、比較・機能研究をゲノミクスや合成生物学の手法と組み合わせる。重点課題は以下のとおり。i) 生化学システムがどのように生体エネルギーシステム、ならびに地球化学的環境の変化と共進化したか (C7 で詳説)。ii) 進化を生物学的同位体記録と関連づけること。生物学的同位体記録は突き詰めれば特定の酵素に起因する。以上のように、我々は酵素の進化と反応メカニズム、微生物生理、同位体地球化学を互いに結びつけて研究する。

独立栄養炭素固定経路上のタンパク質の古酵素学：分子システム進化生物学

過去の生物・生態系の機能を推測する手法として分子系統学的な解析法が確立されている。しかしそうした定量的手法であっても、単に配列群 1 セットを解析しただけの場合 (進化過程の再構築研究ではこれが現状一般的なレベルである)、整合性のある仮説が得られるとは限らない。次世代の進化論的推論ではこれに加えて、生体内分子相互作用の進化過程も再構築し、そこから得られる知識を統合することにより、機能的なシステムの進化史を推定することを目指す。ELSI ではこのようなプロジェクト 3 件が進行中である。

最初のプロジェクトは、炭素固定経路の一つである還元的クエン酸回路（rTCA 回路）を担う 11 のタンパク質のうち 6 つの祖先にあたる 3 つの祖先型タンパク質を復元することを目的としている。rTCA 回路は生命における最古の炭素固定経路の一つとして知られており、3 組のホモログ酵素ペアを有することが示されている。このことは、現存生物中では専門化した酵素 6 種によって触媒される反応が過去には 3 つの酵素によって触媒されていた（各酵素が 2 つの機能を持っていた）ことを示している。これは、限られたサイズのゲノムと荒削りな酵素しか持っていなかった初期生命が炭素固定のような複雑な機能をどのように進化させたのかという最重要課題を解明する上で、鍵となる手がかりを示している。すなわち、初期の酵素は荒削りであるがゆえに複数の機能を備えていた、というものである。この研究は亀谷将史研究員の専門分野で、彼は rTCA 回路を構成する酵素タンパク質間の相同性を発見した研究室の出身である。第 2 のプロジェクトでは Betul Kacar 准主任研究者（ハーバード大学サテライト）が、酸素発生型光合成に関与する炭素固定経路であるカルビン・ベンソン回路で機能するタンパク質（RuBisCO と炭酸脱水酵素）の、系統樹上の配列を復元することを目指している。復元されたタンパク質を合成し、推定される祖先機能を検証し、さらに計算モデルの使用により多機能性酵素から高特異性酵素への進化の決定要因を特定する、といった課題を遂行する上で必要とされるすべての能力が ELSI にはそろっている。原始的な rTCA 回路とカルビン・ベンソン回路の再構築については、Eric Smith 主任研究者ならびに EON 研究員である Christopher Butch と Donato Giovannelli が共同で携わっている。

これとは別の関連プロジェクトにおいて McGlynn 主任研究者と Kacar 准主任研究者が CODH/ACS（一酸化炭素脱水素酵素/アセチル CoA 生成酵素）の祖先型の復元に携わっている。この酵素の系統樹上では、古細菌ドメインの生物から取得された配列と真正細菌ドメインの生物から取得された配列がきれいに分けられることから、古い進化的起源を有する酵素であると解釈される。しかし、現存生物から得られる配列すべてがこのパターンを示すという事実こそが、CODH/ACS システムを用いていた可能性のある原始的な細胞生理を解釈する上では大きな問題となる。原始的ホモログ酵素の配列を古酵素学的に推定し復元することにより、この酵素族の進化を速度論的同位体効果と関連付けて解析することが可能になるほか、過去の炭素や硫黄の同位体シグナルの解釈においても大いに役立つことが期待される。

硫黄代謝の古酵素学

同様に酵素進化を同位体分別と関連づける方向で、McGlynn 主任研究者は硫黄同位体比データに注目し、微生物の硫酸還元に関与する酵素の生化学的性質の進化を明らかにすることを目的とする、カリフォルニア工科大学・ソウル市立大学校との共同プロジェクトを主導している。今日の無酸素環境の硫黄循環において、微生物は主に硫酸還元を利用している。電子移動プロセス、酵素の進化、地球上の硫黄同位体記録を互いに関連づけることにより、酵素の進化と地球上におけるその痕跡について、その全体像を示すことを目指す。

祖先型酵素を有する微生物の形質

祖先型酵素の復元に関する ELSI プロジェクトと並行して、祖先型酵素を生物に再導入するというゲノム科学的な取り組みも行われている。その目的は、現代の酵素と異なる機能を持つ酵素または複雑さのレベルが全く異なる酵素によってどのような形質変化が引き起こされるかを研究することである。rTCA 炭素固定回路に関連して ELSI が追求するテーマは、中核的な代謝経路に特異性の低い荒削りな酵素を持った生物がどのように生存し、進化したかという疑問である。またカルビン・ベンソン回路型の炭素固定に関しては、炭素固定反応の発達へ寄与した原始的な RuBisCO や炭酸脱水酵素の祖先の機能に関する研究に取り組む。特に RuBisCO を用いた炭素固定は独特の同位体分別シグナルを示す。これは主要な酵素の性質に依存するのみならず、海洋・陸上などの異なる環境下において、さらに年代により二酸化炭素や酸素の濃度が変化する中でも RuBisCO が機能するために必要となる炭素濃縮メカニズムにも依存する。硫黄呼吸に関与する酵素については、推定される祖先型触媒を有する細胞の生理学的解析を通じて、硫黄、硫酸、さらには硝酸代謝の進化過程の追跡を試みる。

同位体記録や同位体地球化学との関連性

タンパク質生化学、酵素進化、微生物生理学、最先端の同位体地球化学分析の専門家が ELSI に集まり、我々が同位体古酵素学（isotope-paleoenzymology）と名付ける分野のリーダーとなるための万全の体制が整った。上記分野間の協力により、細胞生理学と個々の触媒（酵素）を過去の同位体記録に直接結びつけることを目標とする。吉田、上野両主任研究者が率いる同位体地球化学グループは新しい超高感度同

位体比質量分析技術を開発した。これによって上記酵素や復元された祖先型酵素の直接同位体分別因子の決定が可能である。例えば生化学・生体エネルギー両分野で起きた革新的事象の進化的相互依存性を理解するために、光合成反応中心IおよびIIに対応するゲノム上の情報の履歴を同位体記録と比較し、RuBisCOおよび関連タンパク質の進化過程を明らかにする。さらに上記の硫黄代謝に関与する酵素の分析を通じて、同位体分別を硫黄呼吸の進化に関連付ける。

光合成の進化

原始的な酵素およびゲノムに関する ELSI のもう一つのプロジェクトは、酸素発生型光合成において高エネルギー電荷分離に関与する 2 つの光化学系（光化学系 I および II）の起源に関する研究である。これは塚谷祐介研究員の専門分野であり、i) 現在は独立している 2 つの光化学系が、1 つの反応中心を構成していた祖先型タンパク質の重複と機能分化に由来するのか、ii) シアノバクテリアの祖先是 2 つの光化学系を遺伝情報の垂直伝播により獲得したのか、あるいは緑色硫黄細菌か紅色細菌（今日、両者はそれぞれ 1 つの光化学系のみを持つ）からの水平伝播により獲得したのかを明らかにすることを目的としている。これは C7 で扱う酸素濃度の上昇にも関連するテーマである。

初期地球のアナログ環境における比較微生物ゲノミクスと生化学・生体エネルギー共役経路の再構築

最初の微生物群集がどのようなものであり、その集団の活動が地球規模の物質循環の進化にどのように寄与したかについての洞察を得るために、我々は初期地球のアナログ環境における微生物の活動や多様性を探究している。初期生命は、現在の地球上の大部分よりもはるかに還元的な環境で生育していた可能性があり、そうした環境と生命の関わりを理解する上でアナログ環境は有用である。

EON 研究員の Nancy Merino は、初期生物圏のモデルとして蛇紋岩熱水系における種間の相互作用を理解するために、シングルセルゲノミクスを用い、長野県の白馬八方温泉とカリフォルニアのシダーズ地域の比較分析を行っている。この研究は ELSI 黒川顕フェローが率いる文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「冥王代生命学の創成」と協力関係にある。さらに Merino 研究員は、McGlynn 主任研究者と協力して、nanoSIMS 技術を用いて単一細胞レベルでの安定同位体研究に適したサンプルの取得に成功した。東京大学佐野教授と共同で測定を行う予定であり、これは白馬八方温泉の微生物叢の直接的な生理学的解析の最初の事例となる。

他のプロジェクトでは始生代初期の海洋のアナログ環境における微生物の活動と生態を研究している。McGlynn 主任研究者の主導の下で、掛川武教授（東北大学）と共同で秋田県奥奥八郎温泉、ならびに地鉦温泉で行われているプロジェクトは、始生代の微生物についての推測を可能にする。地球化学的には、これらの温泉では数メートル四方ほどの空間内に、始生代から原生代までの海洋に対応するような化学環境が存在する。このような場所から生物サンプルを採集し、微生物ゲノムの再構築と比較解析を行うことにより、光や水素、鉄、硫黄などを利用する原始的代謝への示唆が得られることが期待される。

C9. 固体地球の変動は地球生態系をどう変えたのか？

生命圏と大気海洋の長期的な進化は固体地球の熱進化と深く関わっており、そのリンクは近年急速に見直され始めている。その例として、1) 地殻マントルの化学分化と火山活動を通じた大気組成変動・進化、2) プレートテクトニクスがもたらす地球表層物質循環の変動と大酸化事変・動物誕生、3) 内核形成と磁場強度変動が生命圏にもたらす影響、4) True Polar Wander イベントと全球凍結（Kirschvink）などがある。これらの原動力は究極的には地球の冷却に伴う固体地球層構造の進化である。

地球史の記録を読むと、陸地の出現と面積増加に伴う堆積岩の増加とそれによる海洋への栄養塩供給を間接的に示唆する Sr 同位体組成の急変が、21 億年前と 6 億年前に同時に観察されている。これらの急変点は、酸素濃度が急増し、真核生物が出現した時代と、後生動物が出現したタイミングに符合する。これが示唆する因果関係は、萌芽的小大陸の陸地の出現（26 億年前）と大規模な陸地の出現（6 億年前）が海洋に栄養塩を供給し、堆積岩の形成によって、酸素濃度の急増が起きたことを示唆する。6 億年前の酸素濃度の急増は、冷却する惑星がたどる物理的必然である。

46 億年を通じた核・マントル・地殻の分化過程、とりわけ放射性元素の初期分布とその後の固体対流での拡散のタイミングを明らかにするため、まず A3 で行われる高温高圧実験に基づいて鍵となる地球内部物質の物性・元素分配を決定する。これら基礎データに基づき、マントル対流シミュレーション（対流様式変動期の特定）、熱史計算による内核誕生時期の特定、その際の磁場強度変動ダイナモシミュレーション

ョンを行う。

これらの実験的研究は物証に基づいて検証されるべきである。核-磁場リンクについては地球史を通じた岩石試料の古地磁気計測によって行う。古地磁気計測に関しては Kirschvink 主任研究者が既に分析手法を確立している。一方で、丸山主任研究者らは地球史を通じて火成活動が一定では無かった事を明らかにしている (Rino 他、2008)。火成活動は固体地球の熱進化と密接にリンクしており、掘削試料から読む地球表層進化と比較する事によって、地球内部と表層環境のリンクを明らかにする。環境変化が生態系に与えた直接的な影響については、B 4 の地球史解釈・解析法によって決まる大気海洋組成変動と見比べ、環境変化のどの要因が重要であったのかを突き止める。プレートテクトニクス-生命圏リンクについては掘削試料の地球化学分析と表層物質循環解析を通して行う。丸山主任研究者らはこれまでに地球の冷却に伴って、沈み込む海洋地殻がマントルへと水を運ぶようになり、それ以降海水の総量が減少する事を、広域変成帯に刻まれた沈み込むプレートの温度圧力履歴変化から導きだした (Maruyama 他、1996、1997 ; Maruyama 及び Liou、2005)。この海水の減少に伴って大陸地殻が海面上に広域に露出し、大陸削剥による海洋への栄養塩供給が増し、光合成によって作られた有機物が堆積物中に埋没したことが酸素濃度上昇の引き金となった可能性がある。動物誕生時 (6 億年前) の海洋の富栄養で酸化的な環境は地球が冷却する過程において必然的な道筋であったのかもしれない。

GCOE プログラムでは、動物誕生の 6 億前後に絞って計 10 本の陸上掘削を行ない、既に成果を上げているため、本拠点では同様の掘削をより過去の重要なイベント層、すなわち酸素濃度上昇と真核生物出現期について行う。

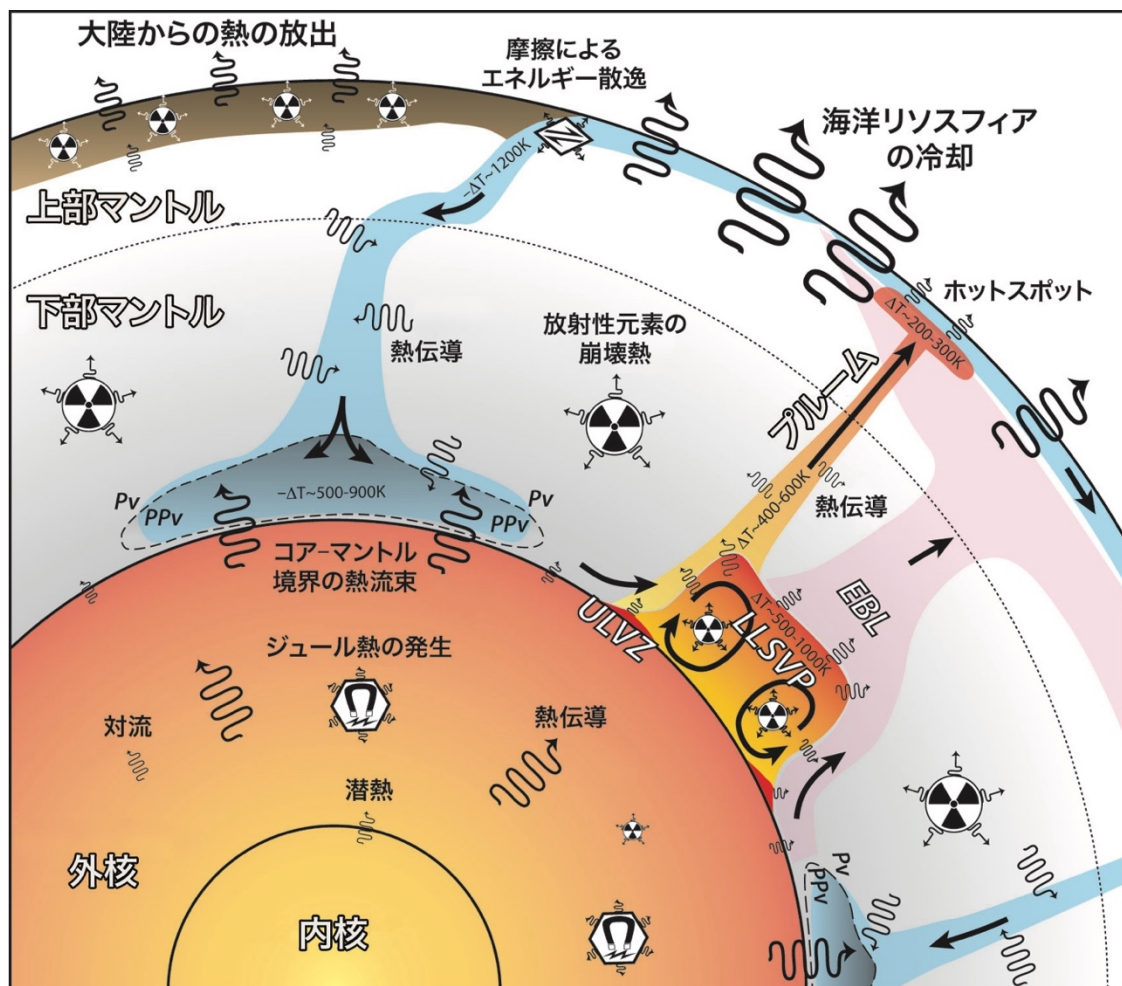


図 8. 地球内部の進化は、地球磁場の上昇や陸地と堆積岩の増加という現象を通して、地球表層環境に影響を及ぼしたはずである (研究テーマ C9 に関連)。

D10. 宇宙の中で地球はどれほどユニークな存在なのか？

「地球型惑星の多様性とはどのようなもので、地球は其中でどのように位置づけられるか」、「地球上の生命の何が特別なのか」など、生命を育む地球型惑星の形成と進化に関する根源的な疑問に対して、観測や実験、シミュレーションに基づいて定量的に取り組むことが可能になってきている。太陽系外惑星（観測された系外惑星の数は 4,000 を超す。その中には、特性が詳細に観測された惑星も含まれる）や太陽系内の天体（8 個の惑星、および他の小天体）に関するデータは絶え間なく増大している。我々はこれらのデータを集め、地球の普遍性と特殊性のいずれも明らかにする（比較惑星学）。さらに生命の出現、およびそれに続く長期的な進化をもたらす条件を特定し、「比較惑星学」の枠組の中でこれらの条件をどのように再現できるかを明らかにすることを目指している。そして大気の組成・総量、海洋総量（海陸比率）、巨大衛星の影響、プレートテクトニクスの開始、磁場の発生、惑星内部の進化、惑星間の位置関係や銀河の進化などに関する研究結果の再検証や統合を進める。地球と近傍の惑星や太陽系外惑星との比較研究を推進し、地球の特殊性と惑星全体の多様性の両面から、惑星全体についての理解を深めることを目的とする。このように統合された知識により、地球外生命を宿す可能性のある天体を絞りこむことが可能となるであろう（D11 参照）。はやぶさ 2 や MMX ミッションに続く JAXA の惑星探査ミッションや、TMT や E-ELT のような次世代大型望遠鏡計画において、ELSI は JAXA・NAOJ と科学面において積極的に協力していく。



図9. ELSI は、近未来の宇宙探査計画（JAXA による火星衛星へのミッションなど）や、日本が関与している次世代大型望遠鏡 TMT を使った太陽系外の地球型惑星のバイオマーカー・リモートセンシング計画に積極的に参画する（研究テーマ D10 及び D11 に関連）。

D11. 地球外生命は探す手だては？

上記 A～C の研究による成果は、地上望遠鏡によるリモートセンシング観測、ならびに宇宙探査計画、特にハビタブルゾーン内の太陽系外地球型惑星におけるバイオシグネチャー（生命存在の痕跡）の探索や進行中のはやぶさ 2 プロジェクト、そして将来の火星衛星探査計画（MMX）に有用である。

次世代大型望遠鏡の TMT や E-ELT によってハビタブルゾーンにある太陽系外地球型惑星の大気のスเปクトル観測が可能になる。日本の国立天文台は TMT の正式なパートナーであり、自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター（ABC）は TMT の計器開発に注力している。系外惑星のバイオシグネチャーのリモートセンシングに応用できる、より一般化された生物学の確立に努め、ABC と協力してバイオシ

グネチャーの条件、および観測方法を確立する。

宇宙における生命の多様性の議論に関しては、地球極限環境生命と地球外生命探査のデータに、地球史、地球内部物理、惑星形成論による惑星の生命誕生・進化条件の議論を強くリンクする。具体的には、内部海をもつ太陽系の氷衛星や、M 型星のハビタブルゾーンの惑星をケース・スタディとして取り上げる。M 型星は暗いため、ハビタブルゾーンは中心星に近い。それゆえ、潮汐作用により、惑星の自転と公転は同期していて、いつも同じ面を中心星に向けているはずである。M 型星の可視光は弱い、X 線、紫外線は太陽などの G 型星に比べても弱くないため、そのような惑星が受ける X 線、紫外線フラックスは中心星に近い分、強烈なものとなる。つまり、同じハビタブルゾーンの惑星と言っても地球とはずいぶん異なる環境にあると予想される。このような議論は木星・土星の氷衛星（エウロパとエンケラドス）の内部海での生命の可能性についての議論にも当てはまる。

サンプルリターン計画に対する貢献も ELSI の重要な役割のひとつである。

JAXA のはやぶさ 2 プロジェクトでは 2020 年に始原的 C 型小惑星（リュウグウ）からサンプルを持ち帰る予定であるが、サンプル中には水分や有機物が含まれていることが予想される。ELSI はミッションの詳細よりも科学的シナリオを策定することに重点を置いており、惑星形成モデルの改訂を通じてサンプル分析結果を解釈し、その前生物化学的意味合いを検討する。

MMX (Martian Moons eXplorer) と呼ばれる JAXA の火星衛星探査計画では、火星衛星（フォボスまたはダイモス）からのサンプルリターンが計画され、2024 年に打ち上げが予定されている。MMX によって火星衛星の起源だけでなく、火星表面の原始環境についても手がかりが得られることが期待されている。フォボスとダイモスの周回軌道は火星に近接しているため、火星への天体衝突によって生成された破片がこれらの衛星の表面にも飛来した可能性があり、サンプル分析により明らかになる可能性がある。初期地球を想定し、一般化した生物学についての知見に基づき、形成初期の火星についても（原始的な）生命が誕生した可能性のある天体として検討する。

D12. 惑星環境において生命の誕生を導く原理とは何か？

ELSI では、生命の様相を捉えるために、地質学的、化学的、微生物学的なデータやモデル（それらは ELSI のユニークな強みである）を最も直接的に結びつけられる理論的な問題に焦点を当てる。複雑な化学システムについて推論する方法を発展させる (B5) ことにより、生化学がどのように地球化学的条件に関連しているかを理解し (B6、C7)、細胞やゲノムの個性性などのモチーフが生物学的組織にとってなぜ根本的な要素であるのか、さらにどのように生命システムがその世界のモデルを具現化し、制約条件から部分的に独立しうのかを理解する。具体的な課題の例を以下に挙げる。1) 分子および可能な反応系の巨大な組合せ空間をマッピングする高度な計算方法を発展させること。2) 生命のどの側面が（反応拡散系においてよく知られた不可逆性原理に由来して）ロバストであり、どの側面がメソスケールのゆらぎや不可逆性を含む新しい物理学を必要とするかを理解すること。3) 記憶、個性性、エージェンシー（行為主体性）、認知などの概念の本質（それらは細胞や高等生物の存在と自律性の両方の基盤となり、生命の進化を司る遺伝と淘汰に基づくダーウィンのダイナミクスを可能にする）を理解すること。ELSI における EON プログラムは、これらの分野で活躍する有能な科学者を特定し、リクルートする上で特に貴重なネットワークである。

先進的計算化学

前生物化学における最重要課題の多くは、分子形態の制約や反応の生成メカニズムを複雑系に組み込み、これらの系の特性について体系的に探索・推論する能力を必要とする。このようなニーズに対応するため、ELSI は並行して複数の新しい計算化学ツールを開発している。例えば Henderson Cleaves 准教授が主導するプログラムは、分子の組合せ空間を扱い、Eric Smith 主任研究者が指揮するプログラムは、大規模な反応系を表現するためのグラフ書き換え文法の新技術を中心としている。

生物学的特性が必然であるか、偶然が定着したものであるかを示すのに組合せ計算化学が役立つ一例として、Cleaves 准教授らは生物が使用するアミノ酸に類似したアミノ酸の網羅的集合を生成し、これを用いて遺伝的にコードされた 20 種のアミノ酸によって提供される化学的特性を、ランダムに選択された代替集合によって提供される化学的特性と比較した。その結果、生物学的集合が概ねグローバルな最適性を表している可能性があり、強い自然選択が働いたことや (Ilardo 他、2015)、独立した生命も同様の集

合を採用しうる可能性が示唆された。他のプロジェクトでは、RNA のユニークな特性を理解する目的や (Cleaves 他、2015 ; Wang 他、2016)、RNA/DNA 出現以前にどのような種類の他の分子が配列上に情報を記憶し得たかを推論する目的 (Guttenberg 他、2015) で、RNA の代替物のリストを作成している。

Smith 主任研究者が指揮する計算化学プログラムは、グラフ書き換え規則を使用して反応メカニズムを抽象化することを中心としており、無制限の分子的状況に適用を可能とすることを目指している。反応パターンのグラフ表示に基づいて、任意のサイズの分子反応ネットワークを少数の出発分子から再帰的に生成することが可能だ。全ての原子位置及び結合配置は、ネットワーク全体を通して追跡することができ、吉田主任研究者のグループにより測定される位置特異的同位体組成との詳細な比較を可能にする。EON ポスドクの Jakob Andersen は化学グラフ文法の分野を代表する世界的な研究者であり (Andersen 他、2012 ; 2014a、b)、前生物化学に関連の深い大規模システムをいくつもモデル化した実績を誇っている。この中には、リボースを含む糖類を生成するホルモース反応ネットワーク (Andersen 他、2013a)、ならびに核酸塩基を生成するシアン化水素重合および加水分解ネットワーク (Andersen 他、2013b ; 2015) が含まれる。これらの手法を拡張して、立体化学および金属中心による触媒作用の研究を ELSI に導入することにより、地球化学現象から代謝が出現する過程に欠かせないと広く考えられている種類の反応を探索することが可能になると期待される (Braakman 及び Smith、2014 ; Smith 及び Morowitz、2015)。

第 3 のアプローチは、化学的整合性を満たすための制約の組合せの複雑さを克服するために並行計算システムの生物学的モデルを用いるものであり、青野真士フェローが独立して取り組んでいる。青野らは、さまざまな制約充足問題を解くための発見的探索モデルを発展させ、これにより未知の化学反応速度論を半定量的かつ低計算コストでシミュレートする可能性を示した (Aono 他、2015 ; Aono 及び Wakabayashi、2015)。

ELSI の他の研究は、有機化学の特徴を (それらの全てではないものの) いくつか再現しうる「おもちゃモデル」となる計算モデルの構築を通し、より抽象的なレベルで複雑な化学システムのダイナミクスを理解することを目指している。この研究の目的は、特定の化学システムをモデル化することではなく、どのような化学的性質や駆動要因が、前生物化学の「乱雑さ」が秩序化した状態に移行するために、そして情報伝達や自然選択などの現象が生じるために必要になるのかを理解することである。Smith 主任研究者や Nathaniel Virgo、Olaf Witkowski 研究員などがこの研究を推進している。

非平衡物理学の基礎

地球上における生命の出現は不可避であり、それらは熱力学的要請から生み出されたという仮説が現代的な形で登場してほぼ 40 年になり、これまでに多くの研究者による詳細な議論が積み重ねられてきた (それらの要約と参考文献については Smith 及び Morowitz、2015 を参照のこと)。他方で、この仮説が正しいか否か、さらには古典的熱力学だけが必要とされるのか、それとも微視的領域やメソスコピック領域の物理学までもが必要とされるのか、それすら今のところ分かっていない。これらの問題に取り組むのが、Smith 主任研究者により指揮される理論的なプログラムである。一例を挙げると、Stuart Bartlett (EON/NASA JPL ; 生命熱水起源シナリオの創始者の一人である Michael Russell (Russell 他、1998 ; Russell 他、2014) との共同研究) は、エントロピー生成率最大化の原理のような古典的理論 (Kondepudi 及び Prigogine、1998) の限界や、原始的代謝の発生との関連から、熱水噴出孔環境における熱的パターン形成と化学的パターン形成との関係を探る。

情報の記憶、個別性、エージェンシー、認知

よく知られている NASA による生命の定義「生命とは、自らを維持することができ、ダーウィン進化を実現できる化学システムである」は地球上の生化学、分子生物学、細胞、または生物にとっての基本条件である特定の構造のほとんどいづれについても全く言及していない。Piet Hut 主任研究者は、NASA の定義を前進させ、そこで省略されていた生命の重要な特徴を抽象化し、「生命の起源は複雑なシステムにおける自律的なエージェントの自発的創発であった」と補完している。Hut 主任研究者によって指揮されるプロジェクトでは、熱力学的不均衡の要請により、通常物質がどのように情報の記憶、個別性、エージェンシー、認知という抽象的な特性を帯びる構造の中に取り込まれるかを理解することを目指している。Nathaniel Virgo と Nicholas Guttenberg は、遺伝情報の継承機構が確立する以前に、進化を可能にする遺伝学的記憶がどのようにして膨大な化学システムから発生し得たかを示す、動的な「リザーバ

ー（貯水池）」モデルを開発した（Virgo 及び Guttenberg、2015）。反応ネットワークシステムのトポロジをその動態に関連させた Virgo の他の研究は、単純な化学反応において自己触媒作用がどのように生じ、集中化と増幅化を可能にするかを示している（Virgo 他、2016）。Hut と Olaf Witkowski はアラヤ・ブレイン・イメージングと共同で、自律性の起源や、自律性がどのようにして認知の最も基本的な能力であり生命の基本的特性である、環境を分類し、それに適応的に反応する能力を導き得るかを研究している。

新しい融合領域としての比較創発論

地球と生命を結ぶ上記プロジェクトの多くが共通のテーマとしているのは、それらの構成要素が持ついずれの特性とも異なる特性を持つ、新しい階層的レベルの出現である。そして、これらのプロジェクトに共通するもう一つのモチーフは、惑星学から生物学まで様々な領域における比較分析のための数々の高度な手法である。私たちが生命を宿す天体として知っているのは地球のみであるが、地球・生命の両方のシステムの内部に十分な多様性があるため、比較分析は法則や因果関係について十分に豊富な情報をもたらす。このため、我々が取り組むサイエンスは、折に触れ強調される " $n = 1$ " というサンプルサイズの不十分さによって制限されることはない。様々な事例における新奇性の創発が有する共通点を理解すべく、地球科学から生命科学に至る各分野で見られる、新しい構造や機能の起源に比較分析を適用し、新しい融合領域を創造することを提案する。ELSI ではこの研究を「比較創発論」という新たな独自の造語とともに推進する。

3. 運営

i) 拠点長

※ 拠点長の氏名、年齢（2017 年 4 月 1 日現在）、略歴（5 行程度）、専門分野を記載すること。

※ 拠点長が交代する場合は、新拠点長がどのような拠点の構築を目指し、如何に達成するかビジョンを添付すること（新拠点長の作成による。様式自由。）。

氏 名： 廣瀬 敬
年 齢： 49 歳

2012 年より現職の文部科学省世界トップレベル国際研究拠点である東京工業大学地球生命研究所の所長。専門分野：高圧地球科学。2006 年井上賞、2007 年日本 IBM 科学賞と Thomson Scientific Research Front Award、2011 年日本学士院賞と European Association of Geochemistry から Science Innovation Award - リングウッドメダルを受賞。2016 年 6 月藤原科学財団から藤原賞を受賞。

ii) 事務部門長

※ 事務部門長の氏名、年齢（2017 年 4 月 1 日現在）、略歴（5 行程度）を記載すること。

氏 名： 櫻井 隆
年 齢： 66 歳

1973 年東京工業大学理学部物理学科卒、1978 年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了（理学博士）。その後、東京大学理学部助手（1978 年）、国立天文台助教授（1988 年）、同教授（1992 年）、自然科学研究機構国立天文台教授（2004 年）を経て、2016 年 4 月より東京工業大学地球生命研究所事務部門長（現在）。専門分野：太陽物理学。2014 年 5 月日本地球惑星科学連合フェロー。

iii) 事務部門の構成

※ 事務部門の構成等について具体的に記載すること。

所長のリーダーシップにより、特に外国人研究者にとって快適な研究・住環境を整備し研究に集中できる体制を構築している。研究者であり、国際的知識・経験及び組織運営の豊富な実績を有している事務部門長の下、次の研究支援体制を設置している。

- ・事務部門長、事務部門長補佐
- ・総務系：チーフ、事務員 1 名
- ・財務系：チーフ、事務員 1 名
- ・ライフアドバイザー：事務員 1 名
- ・秘書室：事務員 7 名
- ・広報室：チーフ、事務員 1 名
- ・計算機・ネットワークシステム：技術員 1 名
- ・国際連携コーディネーター：1 名
- ・URA（所長補佐）：2 名

主な業務は、以下のとおりである。

総務・財務系では、諸規程の整備、人事労務、予算管理・執行、物品等調達、旅費、物品管理、施設、健康・安全衛生管理、学内関係部署等との連絡調整、その他研究所の管理運営に関する業務を行う。

ライフアドバイザーは、外国人研究者及び家族への出入国手続きや住居・保育所の手配等、日常生活の支援、日本語教育等の語学支援に関する業務を行う。

秘書室は、所長・副所長の秘書業務、研究者の事務支援、シンポジウム・ワークショップ等の業務を行う。

広報室は、公報とアウトリーチ業務を行う。ウェブサイトやソーシャルメディア、印刷物を通じての情報発信、一般向け講演会やアウトリーチイベントの開催、高校や海外の研究機関からの訪問者の受入対応などを通じて、ELSI や WPI プログラム全体のミッションや活動を紹介する。

計算機・ネットワークシステムは、ICT 支援、インターネットの管理、研究所共用の計算機資源の運営、情報セキュリティ管理などの業務を行う。

国際連携コーディネーターは、外部からの寄付金等研究資金の獲得、外国人研究者のリクルートなどの業務を行う。

URA（所長補佐）は、事務部門と研究者との調整や研究資金獲得のための申請支援や調達などを行う。

これら業務を担うスタッフは、高い英語能力を有し、専門知識・経験が豊富な職員を配置して、所長の意思決定を支えている。

また、秘書室は一部屋に集約して、秘書間の情報・ノウハウの共有・蓄積を可能とし、研究者の要望も踏まえ、担当秘書（コンタクトパーソン）を割り当て、研究者にとってのワンストップサービスを実現している。

事務スタッフは、日々緊密な連絡をとり密接な情報共有を行っている。

なお、本学の研究戦略室、国際室、研究戦略推進センター等や事務局各部課も研究所の運営に対し、十分な支援を行っている。

iv) 拠点内の意思決定システム

※ 拠点内の意思決定システムについて具体的に記載すること。

所長は、所長自身の任命及び任免を除く ELSI 内の全てに関する決定権を持ち、事務部門長の十分な支援の下、事務部門の運営・管理にも責任を負う。これは柔軟かつ迅速に意思決定を行うためのシステムである。

研究所全体に関わる事案については、所長の下に設置した所長室会議、運営会議及び関係委員会が、所長の意思決定を助ける役割を担っている。所長は、当該会議等の審議結果を参考にして、トップダウンにより研究所の管理・運営を決定している。副所長 1 名は秘書室や研究推進を職掌し、もう 1 名の副所長（外国人）は若手研究者の国際公募や海外研究機関からの訪問者や学生受入など国際化を主導する。

所長室会議は、所長、2名の副所長、事務部門長、2名の所長補佐及び国際連携コーディネーターから構成され、定期的に週1回開催し、研究所の重要案件の最新情報の共有、専門委員会などへの指示系統を一元化するとともに業務の円滑な執行を図っている。

運営会議は、議長の所長、副所長2名、事務部門長及び主任研究者2名から構成され、定期的に月1回開催し、研究所の運営に必要な学内調整・規則整備・研究環境整備・人事案件などについて所長に対し、助言・サポートを行っている。また、運営会議では、研究所の意思決定をスムーズに実行・実施するため、所長補佐、事務部門のチーフ級以上及び秘書等の職員を陪席させ、情報を共有している。

研究所の管理・運営上の機能毎に必要な事項に対応するために各種委員会を設置し、業務を円滑に執行する。例えば Science Steering Committee は所長を補佐し、戦略的な研究の方向付けや融合研究推進を図っている。

また、国際的な観点からの助言を受けるため、外国人を構成員に含むアドバイザリーボードを設置している。所長はアドバイザリーボードの助言を受け、最終決定を行う。

v) 拠点長とホスト機関側の権限の分担

※ 拠点長とホスト機関側の権限の分担について具体的に記載すること。

所長の選・解任はホスト機関の長である東京工業大学学長が決定し、所長の選・解任以外の研究所の管理・運営については所長が決定する。また、大学執行部（学長、研究担当理事・副学長及び総務・財務担当理事・副学長）と月1回の意見交換を行い、大学と ELSI の緊密な連携を図っている。

4. 研究体制（拠点を形成する研究者、サテライト等）

i) ホスト機関内に構築される「中核」

a) 主任研究者（教授、准教授相当）

	事業開始時点	平成 29 年 4 月時点	最終目標 (平成 31 年 10 月)
ホスト機関内からの研究者数	6	12	12
海外から招聘する研究者数	3	2	3
国内他機関から招聘する研究者数	4	1	1
主任研究者数合計	13	15	16

※ 最終目標を達成するための具体的計画（時期・手順など）を併せて記載。

※ 主任研究者については、リストを添付様式「主任研究者リスト」に従い添付すること。平成 29 年 4 月 1 日以降に招聘する主任研究者については、招聘するに当たっての方針・戦略について記載。特に、「世界トップレベル」と考えられる研究者については、その氏名の右側に「*」印を付すこと。

ELSI は研究所設立以来、国内外の研究機関から新しい主任研究者を戦略的に獲得し、8名の外国人（うち1名は女性）を含む、15名の一流研究者から構成される主任研究者体制を構築した。このうち3名のPIはプリンストン高等研究所、ハーバード大学、そして愛媛大学のサテライトで任務に就く。平成 29 年 4 月時点での主任研究者体制は、幅広い分野のトップクラスの研究者から構成されており、ELSI の研究ミッションを達成するに十分な陣容である。さらに、研究所の長期的な発展に向けて、特に若い世代のタレントの獲得を常に意識している。

b) 全体構成

	事業開始時点	平成 29 年 4 月時点	最終目標 (平成 31 年 10 月)
研究者	23 <3,13%> [0,0%]	63 <29,46%> [11,17%]	70 <35,50%> [16,23%]
主任研究者	13 <3,23%> [0,0%]	19 <8,42%> [1,5%]	16 <9,56%> [1,6%]
その他研究者	10 <0,0%> [0,0%]	44 <21,48%> [10,23%]	54 <27,50%> [15,28%]
研究支援員数	0	29	29
事務スタッフ	5	25	25
「中核」を構成する構成員の合計	28	117	124

- ※ 各欄の人数を記載し、研究者については下段に<外国人研究者数,%> [女性研究者数,%]としてそれぞれの内数を記載すること。
 ※ 最終目標に向けた具体的な計画や既に決定している主な研究者採用予定（特に主任研究者の場合）など、特記すべきことがあれば記載すること。

ii) 他機関との連携

- ※ サテライト的な組織を設置して国内外の他の機関との連携を行う場合は、当該連携先機関の名称、サテライトの拠点構想における役割、サテライトの人員構成・体制、ホスト機関と当該連携先機関の間の協力の枠組み（協定等の締結、資金のやりとりの考え方等）等について記載すること。
 ※ サテライトに主任研究者を配置する場合は、主任研究者のリストを添付様式「主任研究者リスト」に記載すること（サテライト名を明記）。
 ※ その他、サテライト的な組織を設置しないものの、国内外の他の機関との連携を行う場合は、当該機関の名称、拠点構想における役割、連携の概要等について記載すること。

1) サテライト

本拠点は以下 4 機関にサテライトを設置する。

愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センターは、地球深部の研究に関し、世界的に見ても最先端の研究成果を挙げ続けている。本研究センター長・入船徹男教授は主任研究者並びにサテライト長として ELSI に参画する。また、本研究センターに所属する他の研究者（うち 1 名は女性）もサテライトで研究を実施する予定である。

愛媛大学サテライトの主たる役割は、マルチアンビル装置を駆使した高圧/高温実験による固体地球の起源と進化の探求である。本サテライトが有するマルチアンビル装置は、圧力と温度のレンジが限られるものの、レーザー加熱型ダイヤモンドアンビルセルなど他の装置に比べて、実験中のサンプル温度の制御が正確に行えるという利点を持つ。愛媛大学サテライトのアンビル装置と、東京工業大学の装置とのコンビネーションにより、地球深部の構造や動態に関する問いかけに対して最適な解を提示することが可能となるだろう。

東京大学 大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

平成 29 年 4 月に ELSI は新しいサテライトを東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻（東大・EPS）に設置する。ELSI の廣瀬所長は、東大・EPS の地球化学や熱的進化モデリングの専門家と協力し

て、地球の形成と初期進化に関する自らの研究を推進し、ELSI と東大・EPS との共同研究を牽引する。このサテライトの設置のため、廣瀬所長は平成 29 年 4 月より東京大学にクロス・アポイントメントされ、仕事時間のうち 20%は東大・EPS サテライトにて勤務する。東大・EPS は、宇宙生物学、惑星科学、太陽系探査、初期地球における地球化学、生命の進化などの分野で活発な研究グループを有し、東大・EPS の研究は現在の ELSI メンバーの研究と相互補完的であると言える。廣瀬所長は、太陽系および太陽系外の惑星の形成、進化とハビタビリティ（生命の存在可能性）に関する研究や、初期地球における地質学、地球化学そして生命の研究などの分野で ELSI と東大・EPS サテライトとの共同研究を推進する。このような共同研究体制を構築するために、ELSI と東大・EPS サテライトの両研究機関で働く研究者を雇用し、共同でビジターを受け入れ、国際ワークショップを共催することを予定している。

プリンストン高等研究所 学際研究プログラム

プリンストン高等研究所学際研究プログラムの Piet Hut 教授は ELSI（東京工業大学）とプリンストン高等研究所にそれぞれ約半年ずつ滞在する。Piet 教授がサテライトにいる期間を中心に、ELSI・EON は研究者をプリンストン高等研究所へ派遣する計画である。プリンストン高等研究所は言わずと知れた世界最先端の研究所であり、常時 100 名規模の他機関に所属する研究者がビジターとして滞在する。これは ELSI・EON の研究者が一流研究者と研究上の意見を交換し、新たな人的ネットワークを形成するのに理想的な環境である。

ハーバード大学 生命起源イニシアチブ

ハーバード大学生命起源イニシアチブからは、合成生物学の権威である Jack Szostak 教授が主任研究者として、またサテライト長として ELSI に参加する。ELSI とハーバード大学サテライトは若手研究者の相互交流を通して、初期地球環境に関する ELSI の最新の研究成果を足がかりに、生命の起源についての諸問題を検討する。

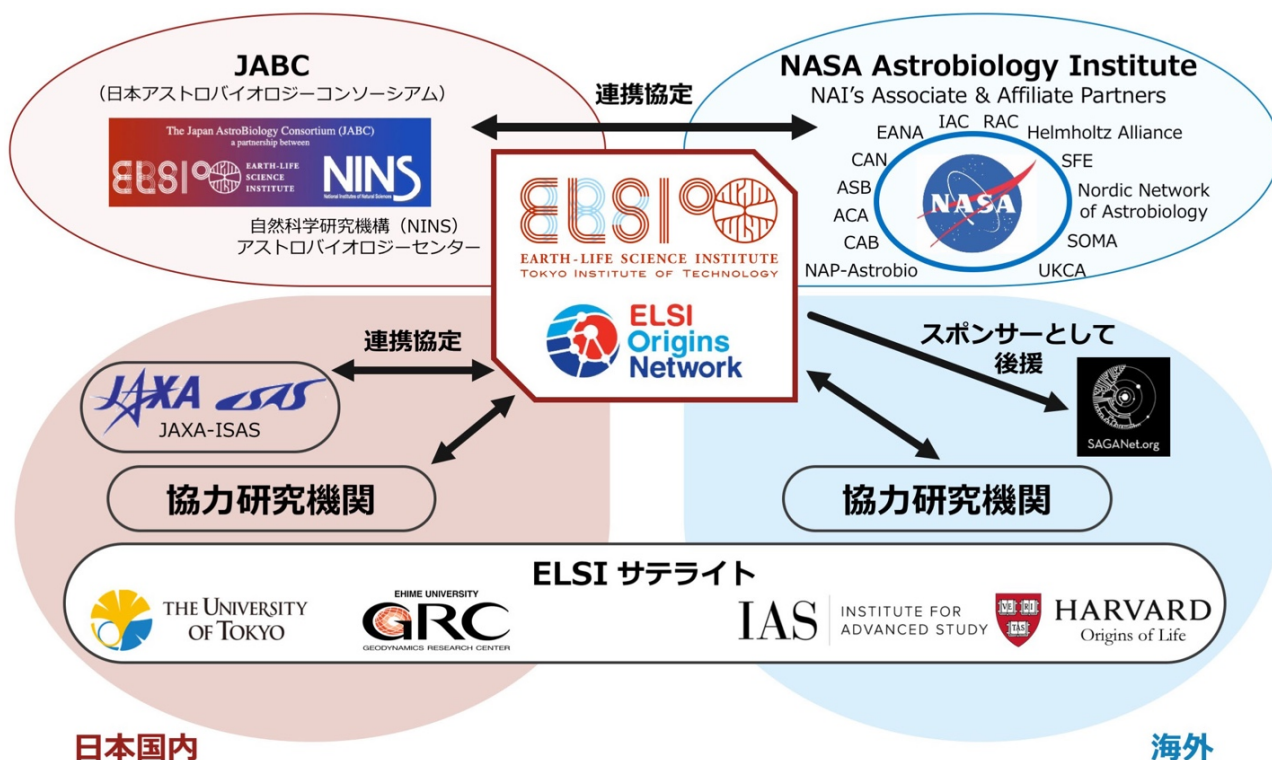


図 10. 国内外のサテライト機関、協力研究機関（連携機関）

2) 協力研究機関（連携機関）

ELSI は①海洋研究開発機構（JAMSTEC）、②ハーバード大学、③カリフォルニア工科大学、④コロロンビア大学などの国内外の研究機関とも強い結びつきをもって研究を推進する。ELSI は JAXA/ISAS（宇宙

航空研究開発機構・宇宙科学研究所）と連携協定を結んでいる。さらに、図 10 に示すように、ジョン・テンプルトン財団からの研究資金獲得により開始した EON (ELSI Origins Network) プロジェクトを通じて、海外の協力研究機関との共同研究を展開している。EON プロジェクト研究員は任期の概ね半分の期間は ELSI で、残りの期間はこれら海外研究機関で研究を実施する。ELSI は上記の研究機関と連携し、共同研究をはじめ人材やアイデアの交流を図る。

5. 環境整備

※ 以下のそれぞれの項目についてどのような措置をとるのか、時期・手順も含めて具体的に記載すること。

i) 研究者から研究以外の職務を減免するとともに、種々の手続き等管理事務をサポートするためのスタッフ機能を充実させることなどにより、研究者が研究に専念できるような環境を提供する。

ELSI は研究者が研究に専念できる研究環境の提供に努める。主任研究者、特任准教授、特任助教やポスドク研究員は各々の研究上の興味を自由に追求し、ゆるやかな結びつきの研究グループを形成して協力し合いながら研究を進める。科学的素養を持つ URA を雇用し、研究者に対し、研究以外の雑務を軽減するための支援を行う。URA は、外国籍の研究者に対し、研究申請書の作成、外部研究者との連絡等、各種の支援も行う。東京工業大学から参加する主任研究者に関しては、研究以外の業務を軽減するため、少なくとも学部学生の教育については免除されている。

所長は所内の研究者全員の実務負担を軽減するため、独自の方策により研究中心の効率的な事務体系を構築した。研究者と同様に事務スタッフも評価に基づきインセンティブを与えられる。事務スタッフにも最新の研究成果に関する情報を提供し、研究者と事務スタッフとの円滑な意思疎通を図ると共に、事務スタッフの業務に対する意識の高揚を図る。

ii) 招聘した優秀な研究者が、移籍当初競争的資金の獲得に腐心することなく自らの研究を精力的に継続することができるよう、必要に応じスタートアップのための研究資金を提供する。

海外から招聘した主任研究者には、スタートアップ経費として、理論研究のみか実験室での実験も行うか等を考慮し、着任初年度及び次年度に 500~1,000 万円/年程度の資金を提供する。また、研究所長との協議の上、外部研究資金を獲得するまで、さらなる所長裁量経費を与える可能性もある。特に外国人主任研究者が日本において各種競争的資金を獲得するために十分な範囲の支援を提供する。

また、所長ファンドを活用し、若手研究者の自由で柔軟なアイデアや異なる背景を持つ研究者間の議論から生まれた学際的な融合研究を推進する。所長ファンドは予備的研究を支援し、競争的資金の獲得へとつなげることを目的としている。春と秋の年二回程度、共同研究計画の提案を受付ける。支援課題について追跡調査を行い、中盤期以降に本制度の改善を行うこととしている。

iii) ポスドクは原則として国際公募により採用する。

我々は主任研究者以外に、国際公募により、ポスドク研究員、特任助教、特任准教授を採用する。専門性や能力が、ELSI の研究目標に適合する必要があるほか、ELSI 内外の多様な背景を持つ研究者との共同研究に率先して取り組む積極性や柔軟さが求められる。若手研究者はゆるやかな研究グループに属するものの、独立して自由に研究を行う。ELSI のオープンでフラットな研究体制の中では、若手研究者の研究上の独立性が保障される。これは若手研究者が研究室主宰者の指導のもとで研究室主宰者に協力する日本の伝統的な講座制度とは異なるものである。若手研究者は自身の研究に合致した複数の主任研究者や若手研究者からアドバイスや協力を得る中で独自のネットワークを形成する。このように研究者間の活発な共同研究や融合研究を促進するとともに、研究体制を見直し、改善する機会を設ける。

ELSI がトップ研究者の獲得に成功し、彼らの研究環境が整った今、新しいメンバーを戦略的に追加することは、共同研究プロジェクトをスピードアップし、より多くの成果をもたらすだろう。

iv) 職務上使用する言語は英語を基本とし、英語による職務遂行が可能な事務スタッフ機能を整備する。

ELSI 内の公用語は原則英語とし、書類等も原則、英語で作成する。このため、英語による職務の遂行が可能な東工大事務職員を優先的に配置する。また、英語に堪能なスタッフを雇用し、海外在住または留学等の経験を有する日本人及び外国人スタッフの雇用も積極的に進める。

v) 研究成果に関する厳格な評価システムと能力に応じた俸給システム(例えば年俸制等)を導入する

(主にホスト機関外からの招聘研究者が対象。拠点形成以前よりホスト機関に所属していた研究者についてはホスト機関が給与を支給することが基本)。

研究者の研究業績の評価は毎年行う。幾つかの段階から成る評価プロセスへと改めた。まず、研究者は各々の研究活動を整理し、学術雑誌への論文掲載、研究の科学的価値、ELSI の研究所としての活動への貢献、外部競争的資金の獲得状況などに関する報告書を提出する。そこに新しく割り当てられたメンターがコメントを加え、評価結果は経験豊富な PI と所長室へ提出される。傑出した業績を生んだ研究者に対しては、より良い研究環境（スペース、資金援助等）や待遇（昇給や雇用延長など）を与える。評価結果は研究者一人一人に伝えられるが、特に重要なのは、支援が必要な研究者が改善に向けてのフィードバックを受け取り、一年を通じてメンターと意見交換する、協調的な観察体制づくりである。加えて所長は定期的に研究者とコミュニケーションをとり、研究者の将来の方向性について意見交換を行う。

また、優れた実績を上げた事務スタッフには、インセンティブを与える。

vi) 「世界トップレベル拠点」としてふさわしい研究室、居室等の施設・設備環境を整備する。

大岡山キャンパスの地球惑星科学専攻棟に隣接する建物に、十分な研究スペースを確保した（発足時に約 1,500 m²、2015 年までに 5,000 m²程度まで増）。建物内には、研究者のオフィスや実験室に加え、学際的な研究の鍵となる研究者間のコミュニケーションを促進するための共通スペースを用意する。共通スペースは、休憩の場として、さらに定例イベントを企画・開催することにより、研究者や事務職員が集まるような空間とする。

ELSI は、大型計算機でのシミュレーションを行うに当たって、恵まれた環境にあると言える。ELSI の研究者は、東京工業大学学術国際情報センター（GSIC）が所有する国内有数のスーパーコンピューター「TSUBAME」に加え、牧野フェローのグループによって開発されたスーパーコンピューター GRAPE シリーズや、10 ペタフロップス計算機「京」とその後継であるポスト「京」、国立天文台、JAXA、JAMSTEC を含む他の国立研究機関のスーパーコンピューターも利用することができる。

vii) 世界トップレベルの研究者を集めた国際的な研究集会を定期的（少なくとも年 1 回以上）に開催する。

広範囲のテーマを扱う国際シンポジウムを毎年開催する。テーマは毎年、ELSI の独創的な研究に基づいて設定する。シンポジウムには、世界をリードする科学者と若手の活発な研究者を海外から招聘する。他に、最新の話題や学際的なトピックに関する比較的小規模のワークショップも、毎年数回開催していく予定である。

viii) 上記のほかに、世界から集まるトップレベルの研究者が、国際的かつ競争的な環境の下で快適に研究に専念できるようにするための取組みがあれば記載すること。

多くの外国人研究者にとって、生活環境はおそらく最大の関心事だろう。外国人研究者と家族のため ELSI では、ビザの取得や学校への転入、銀行口座の開設、特別食、ゴミ、交通、税金や年金等、生活に関わるあらゆるアドバイスを来日前から受けられるよう生活アドバイザーを置く。なお、東京工業大学が所有する宿泊施設である百周年記念国際交流会館の家族用 20 戸、単身用 100 戸は、外国人研究者とその家族が住居を探すまでの間、一時的に使用することができる。

外国人研究者にとってのもう一つの関門として、外部研究資金の獲得がある。ELSI では、URA が申請書の作成等を積極的に支援すると共に、東京工業大学の研究推進部及び国際部も支援を行う。

6. 世界的レベルを評価する際の指標等

※ 以下のそれぞれの項目について、具体的に記載すること。

i) 対象分野における世界的なレベルを評価するのに適当な評価指標・手法

「世界的に見える」研究拠点を評価する上では、研究活動の水準や研究所・研究者の外部からの評価など、さまざまな観点から総合的に検討する必要がある。以下に具体的な評価指標を挙げる。

- 1) 研究成果発表の質と量、国際会議における発表数、研究集会の開催数、研究費の獲得実績など
- 2) 国際研究協力の状況、ビジター数、研究所・研究者に対する研究表彰など

学際的研究を促進し、新たな学問領域を創出するための取組みを慎重に考慮することも重要である。

ii) 上記評価指標・手法に基づいた現状評価

研究アクティビティの現状評価

ELSI の主任研究者 15 名中 8 名が「h-index」35 以上である。ここから ELSI は世界トップレベルの研究所として位置づけられる見通しがあると言える。6 名の主任研究者は 50 歳未満であり、研究上の大きな進歩を遂げる上で中心的役割を果たすことが期待される。

2014 年以降の特筆すべき発表論文を以下に挙げる。

- Experimental determination of the electrical resistivity of iron at Earth's core conditions (2016) Nature 534: 95-98.
- Lunar true polar wander inferred from polar hydrogen (2016) Nature 531: 480-484.
- Evidence for global electron transportation into the jovian inner magnetosphere (2014) Science 345: 1581-1584.
- Low Core-Mantle Boundary Temperature Inferred from the Solidus of Pyrolite (2014) Science 343: 522-525.
- The Charon-forming giant impact as a source of Pluto's dark equatorial regions (2017) Nature Astronomy 1: 0031.
- Oligoarginine peptides slow strand annealing and assist non-enzymatic RNA replication (2016) Nature Chemistry 8: 915-921.
- Synthesis and stability of xenon oxides Xe2O5 and Xe3O2 under pressure (2016) Nature Chemistry 8: 784-790.
- Pressure-induced nano-crystallization of silicate garnets from glass (2016) Nature Communications 7: 13753.
- A key genetic factor for fucosyllactose utilization affects infant gut microbiota development (2016) Nature Communications 7: 11939.
- Carbon-depleted outer core revealed by sound velocity measurements of liquid iron-carbon alloy (2015) Nature Communications 6: 8942.
- Klebsormidium flaccidum genome reveals primary factors for plant terrestrial adaptation (2014) Nature Communications 5: 3978
- Accretion of Phobos and Deimos in an extended debris disc stirred by transient moons (2016) Nature Geoscience 9: 581-583.
- Computational support for a pyrolitic lower mantle containing ferric iron (2015) Nature Geoscience 8: 556-559.
- Water contents of Earth-mass planets around M dwarfs (2015) Nature Geoscience 8: 177-180.
- Stability of hydrous silicate at high pressures and water transport to the deep lower mantle (2014) Nature Geoscience 7: 224-227.
- Origin of microbial biomineralization and magnetotaxis during the Archean (2017) PNAS DOI: 10.1073/pnas.1614654114
- A virus of hyperthermophilic archaea with a unique architecture among DNA viruses

(2016) PNAS 113: 2478-2483.

- On the universal structure of human lexical semantics (2016) PNAS 113: 1766-1771.
- Hadal biosphere: Insight into the microbial ecosystem in the deepest ocean on Earth (2015) PNAS 112: E1230-E1236.
- Oxygenic photosynthesis without galactolipids (2014) PNAS 111: 13571-13575.

ELSI は、米国ジョン・テンブルトン財団から、総額 550 万ドル（約 6 億 7 千万円、2015 年 7 月～2018 年 3 月）の研究資金を獲得し、「EON (ELSI Origins Network) プロジェクト」を開始した。他の研究資金の確保も順調である。例えば、特別推進研究、新学術領域研究、基盤研究（S）などの大型科研費を獲得し、研究活動の継続的な発展を確かなものとしている。

研究所・研究者の外部からの評価

シニアから若手まで ELSI の研究者たちはそれぞれのレベルで高い評価を得ている。主任研究者らは紫綬褒章や日本学術振興会賞、藤原賞をはじめとする賞を受賞し、Royal Institute of Navigation など著名学会のフェローに選出されている。若手研究者らも IUPAC-SOLVAY International Award for Young Chemists 等、若手を対象とした賞を受賞している。

融合研究の推進と新たな学問創出に関わる現状評価

学際的な研究を推進するための取り組みが、研究成果の発表に至っている（例えば、Earth Planet. Sci. Lett. 2014 386: 112-125; Astrobiology 2015 15: 430-441; PLoS ONE 2015 10: e0140663; Geochim. Cosmochim. Acta 2016 177: 205-216; Orig. Life Evol. Biosph. 2016 DOI: 10.1007/s11084-016-9516-z）。研究所として研究ディスカッションの機会を設けているのに加えて、様々なテーマについてのディスカッション・グループが研究者のあいだで自発的に立ち上げられ、今後の学際研究協力に向けた話し合いが持たれている。

ELSI の研究者は新しい研究領域となる概念を構想した。今後 5 年の間に ELSI はこの「比較創発論」の概念をさらに具体化することを目指している。

iii) 本事業により達成すべき目標（事後評価時）

- a) 関連分野の研究機関の中で世界的リーダーとしての地位を確立する。
- b) 寄付金や競争的研究資金を安定的に獲得し、健全な財務基盤を確立する。
- c) ELSI が牽引する研究コミュニティの成長に尽力し、その多様化と国際化を促進する。
- d) 次世代研究者の育成とキャリア形成を促進する。ELSI は研究者、共同研究者、そしてビジターが集い、アイデアを交換する国際拠点として、研究関連人材の交流や獲得、育成を戦略的かつ計画的に推進する。
- e) 新たな融合研究分野「比較創発論」を創造する。これは、地球科学から生命科学に至るあらゆる自然科学分野に見出される新しい構造や機能の創発現象に現代的な比較分析手法を適用することにより行う体系的な研究である。

7. 研究資金等の確保

今後の見通し

- ※ 本プログラムからの支援額と同等程度以上のリソースを、どのようにして確保するのか、具体的な見通しについて記載すること。
- ※ その際、競争的資金等の研究費については、「研究活動の実施に必要な時間（本件拠点における研究活動（他の競争的資金による研究活動も含む）の実施に必要な時間）の割合」を勘案して算入すること。また、研究費の獲得の見通しについては、これまでの実績を踏まえた現実的なものとする。

ELSI は、これまでに科学研究費補助金（科研費）をはじめ、受託研究費、共同研究費、運営費交付金及び事業運営費など、多額の研究資金を獲得してきた。

平成 28 年現在の主たる研究資金は、米国ジョン・テンブルトン財団からの研究資金及び、特別推進研究、新学術領域研究などの大型科研費である。ジョン・テンブルトン財団からの研究資金は、総額 550 万ドルにのぼり、地球と生命の起源に関する研究基盤を強固なものにすることができた。加えて、平成 28

年度には、特別推進研究や NEDO の研究費を獲得した。

平成 29 年度以降の研究資金の獲得見込みに関して下記の表にまとめた。WPI プログラムからの支援に比する研究資金を確保できる見通しである。

	平成 29 年度から平成 33 年度までの年間予定獲得額（百万円単位）
科研費	363
寄附金	146
受託研究費	18
法人運営費	102
合計（単年）	629

上記のような研究資金獲得の見通しを確実なものとするために、ELSI の研究者全員に対し、以下の組織的かつ戦略的な取り組みを実施する。

- ・ 研究者がより多くの競争的資金プログラムに申請できるよう、研究に専念できる環境を整える。
- ・ URA は、東京工業大学研究推進センター、研究推進部、国際部の協力を得ながら、競争的研究資金申請を徹底的にサポートする。
- ・ 各研究者に対し、日本語及び英語文書の編集に関する支援、競争的資金プログラムの情報提供、若手研究者を対象にした申請書添削、ELSI 内外における共同研究のコーディネート、ELSI 内での申請書の事前査読会の開催などを行い、国内外の研究資金提供機関が実施する競争的資金プログラムへの応募を包括的に支援する。

研究所長や事務部門長は東京工業大学の企画立案組織と共に、政府の政策ポリシーや、関連助成金や競争的資金プログラムの動向・状況分析を随時行う。これにより、基礎研究や大型研究費申請に効率的に取り組むことができる。また、この現況分析に基づき、将来を見据えた大型研究プロジェクトを政府に対し積極的に提案していく。

その他

- ※ 補助実施期間終了後の取り組みについて記載すること。
- ※ 他の機関への波及効果（ホスト機関の他部局や他の研究機関が世界トップレベルの研究拠点を構築する際に参考となりうる要素を持つ先導的なものであるか）について記載すること。
- ※ その他、世界トップレベルの拠点を構築していくに当たり重要な事項を記載すること。

(1) 補助実施期間終了後の取組

ELSI の所長は、東京工業大学と連携しつつ、非営利団体、民間企業などから寄付金を得ることに最大限の努力を払う。「地球の形成や生命の起源」「地球外生命」や「はやぶさ 2 ミッション」、「火星衛星からのサンプルリターンミッション」などの ELSI の研究目標は、一般の方々にとっても興味の対象であり、寄付金集めの大きな助けになるだろう。

とくに、米国ジョン・テンブルトン財団から、総額 550 万ドル（約 6 億 7 千万円）の研究資金を獲得したことは特筆に値する。ELSI はこのグローバルファンドをもとに、研究基盤の一層の強化を図り、地球と生命の起源と進化を解明する研究を加速する。このため、ELSI が研究ハブとなり、異分野にわたる世界中の研究者同士をつなぐネットワークの発展を目的とする「EON（ELSI Origins Network）プロジェクト」を開始した。ELSI では、ジョン・テンブルトン財団からの資金獲得と EON プロジェクト成功を礎とし、外国からのファンド獲得を積極的に行っている。

このように、WPI プログラムによる支援終了後も、ELSI の活動を、1) 主任研究者をはじめ、研究者達が獲得する外部資金、2) 東京工業大学からの継続的な支援、3) 外部からの寄付金、により継続する。

(2) 他の機関への波及効果

ELSI では次の 3 つを実現し、他機関の参考となるモデルケースを確立する。主な実績は以下の通り。

1) 英語による業務

国際化は本プログラムが意図する重要な到達点である。これに対し、ELSI では以下を実現し、他機関において海外研究者を招聘する際のモデルケースを確立する。

- ① 原則英語による事務業務
- ② 業績評価に基づく給与体系とインセンティブ付与
- ③ 外国人家庭のサポートシステム

2) 研究指向

ELSI は研究指向の強い拠点を目指し、他機関においても、より研究に重点を置いた事務組織が構築できであろうモデルケースを確立した。ELSI ではこの目的のために、以下を実施した。

- ① 毎年、業績評価を実施し、各研究者の研究を評価する。評価結果は年俸に反映させる他、研究所長の判断で付与するインセンティブにも反映する。
- ② 科学的素養を持った URA が、多方面に渡り全ての研究者のサポートを行う。
- ③ 東京工業大学から主任研究者として ELSI に参加する者については、学部教育の義務を免除するため、ELSI の教授として再任命する。
- ④ 研究者の側に立った事務部門を確立し、最新の研究成果は事務スタッフにも幅広く発信される(3. 運営 iii) ならびに iv) を参照)。

3) 積極的なアウトリーチ活動

以下のような取組により、積極的にアウトリーチ活動を展開する。これは他機関においても、研究成果の還元という点で参考になるはずである。

- ① 科学的素養を持った広報チームが ELSI の広報とアウトリーチ全般を担う。
- ② 広報室は、国内外のプレスリリース、高校生や一般向けイベント、様々なステークホルダーとの双方向デジタルコミュニケーションなどを企画し、ELSI や WPI プログラム全体のミッションや活動を紹介する。
- ③ 積極的な広報とアウトリーチ活動は、ELSI とホスト機関東京工業大学のプレゼンスを高め、双方にとって有益となろう。

(3) その他

1) 研究者等の海外交流

関連する研究分野の国際的なハブとしての役割を担い続けることを目指す。サバティカル休暇中の世界トップクラスの教授陣を半年ないし 1 年間招聘する他、有力な研究者、精力的に活動する若手研究者の短期滞在をサポートする。同時に、ポスドク研究者を含む ELSI の研究者には、海外提携機関に一定期間滞在し、滞在先での意見交換、共同研究の実施を推奨する。とくに EON プロジェクトのポスドクは、任期の概ね半分を、海外の研究機関で過ごしている。

2) 研究成果の公表

国際会議などにおいて、研究者が自身の研究成果を発表し、セッション等を企画することを奨励する。これにより ELSI のプレゼンスが高まり、研究者や学生の獲得に役立つ。

3) 相乗効果をもたらすための相互理解

新しく創設された融合研究所として、ELSI 内でのコミュニケーションを促進している。共用スペースを設けるとともに、主任研究者の Piet Hut が所属するプリンストン高等研究所のモデルにならい、毎日、毎週、毎月のイベントを企画する。研究目標を共有・整理し、研究者間での相互理解を深める機会を設ける。このような場は、ELSI Seminar、Assembly、Youchien に発展した。ELSI Seminar は招聘された外部研究者が講演と議論を行う。ELSI Assembly は ELSI の研究者によるサイエンスミーティングであり、Science Steering Committee の主導により、戦略的かつ長期研究目標などの重要課題が議論される。また、前年の成果や最新の研究に関して発表する Assembly も開催しており、互いの興味やフィードバックを共有することに役立つ。ELSI Youchien は、異分野間に存在する障壁を取り除くことを目的とする。若手研究者が、他の研究者や事務スタッフに向けて、自身の専門分野を平易な

言葉で発表する。

4) 次世代の研究者の育成

ELSI は東京工業大学の大学院教育に寄与するため着実な進歩を遂げている。外国人主任研究者や准教授の中から東工大の学院やコースの主・副担当教員になる手続きを進めている所である。博士課程進学希望学生を積極的に受け入れるべく、ELSI にて研究指導しており、更に数名の博士課程学生の受入を予定している（出願中）。また ELSI の教員は、授業や国際教育プログラムの担当を計画している。このように博士課程学生と指導教員が、ELSI と他部局の双方に於いて、融合研究を発展させてゆく。

地球生命研究所の研究目標

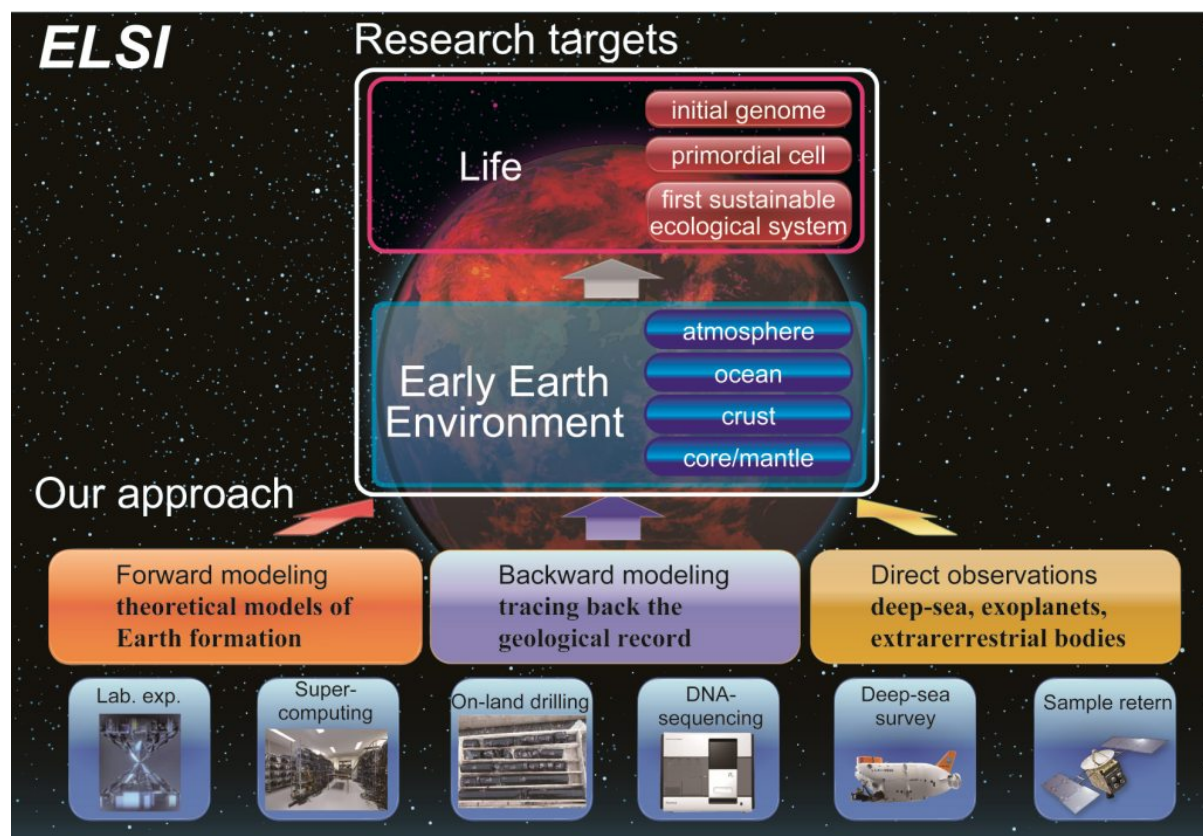
拠点長

廣瀬 敬

1. 本拠点の研究目的

本拠点の研究のゴールは、「生命はいつどこで生まれ、どのように進化して来たのか」という、人類の根源的な謎の解明である。これはギリシャ哲学に始まる自然科学が問い続けてきた最も重要なテーマの一つであり、その重要性は言を重ねる必要はないだろう。しかし、直接の証拠がほぼ皆無であるがゆえに、この問題はこれまで多くの研究者をはね返してきた。現代の科学をもってこの問題に挑むことができるようになったのはごく最近のことである。

本拠点の名称 Earth-Life Science Institute とは、地球と生命の研究のどちらも重視し、地球物理学、地質学、生物化学、分子生物学、コンピュータ科学の異分野融合によって、この問題に取り組む意図を示している。本拠点は、初期生命との関係を意識しながら、初期地球に関わるさまざまな分野をつなぐ。



われわれの研究戦略の特色は、生命を生んだ「場」、すなわち地球に着目し、生命の誕生を、地球における生態系の誕生、と捉えている点である。生命の起源に関するこれまでの議論は、原始生命に関する生化学的な研究が主であった。しかし、生命の活動は周囲の環境とのエネ

ルギーや物質のやり取りを通して成立している以上、生命の起源に関する研究は初期地球環境の研究と本来不可分である。

生命誕生前後の地球環境は今と大きく異なっていた可能性が高い。たとえば地球は硫酸の海に覆われていたかも知れない。われわれはこれをフォワード（地球形成の理論モデル）、バックワード（地質記録のさかのぼり）の2方向から解き明かす。前者は、「地球の起源」を追うことに他ならない。惑星形成理論と世界最先端の計算機シミュレーション技術によって、太陽系における地球形成プロセスを第一原理的なところから明らかにする。さらに日本のお家芸である高压高温実験を駆使して原始地球の物質分化を明らかにし、その中心核から大気・海洋までを再現する。後者は、東工大地球史資料館に保管されている16万5千個の地球史試料を活用する。地球に地質記録が残されている35億年前までの環境変動を読み取り、それ以前の冥王代の環境を推定する。これら初期地球に存在した、生命に必須の栄養塩やエネルギーの供給が可能な「場」を考え、生命を生んだ環境を特定する。

ゲノム科学分野では、特定の環境因子と微生物の遺伝子プールとの関係が現在明らかにされつつある。生命が誕生した環境が特定できれば、それを使って、初期地球の特殊環境下で誕生した生命の「初期ゲノム」を推定できる。さらに、合成生物学により初期細胞を実際に構築することを試みる。「生命の起源」とは「持続的な生態系の誕生」を意味している。そこでこれらの手法をさらに発展させ、初期地球の激しい環境変動下においても安定的、持続的に生命を存在させた、初期生態システムの解明を目指す。

われわれはさらに、実証（観測）ベースの研究も指向する。本拠点の主任研究者には、「しんかい6500」による深海底熱水系の微生物探査、「はやぶさ2」による始源的小惑星探査の責任者が含まれている。これら深海底熱水系や始源的小惑星は、地球生命の誕生に際し必要なエネルギーと材料をそれぞれ提供した可能性がある。さらに、上記の「地球生命学」の研究を通じ、われわれは生命惑星としての地球の特殊性を理解しようとしている。これは同時に、生命惑星の普遍性の理解、生命惑星学の創出につながる。われわれはその成果をすぐさま活かすべく、近未来の宇宙探査計画（内部海を持つエウロパ、エンケラダス）や、次世代地上望遠鏡を使った太陽系外の地球型惑星のバイオマーカー・リモートセンシング計画に積極的に参画する。

2. 必要な環境整備

東工大の研究環境は決して悪いものではない。その証拠に、主任研究者個人の業績はどれも世界トップレベルにある。しかし、それらのほとんどはすでに確立した学問分野内でのものであり、学際研究を推進するにはかなりの努力が必要である。本拠点では、個々の研究者がそれぞれの学問分野での優位性を保ちながら、同時に異分野融合研究を行う環境を整える

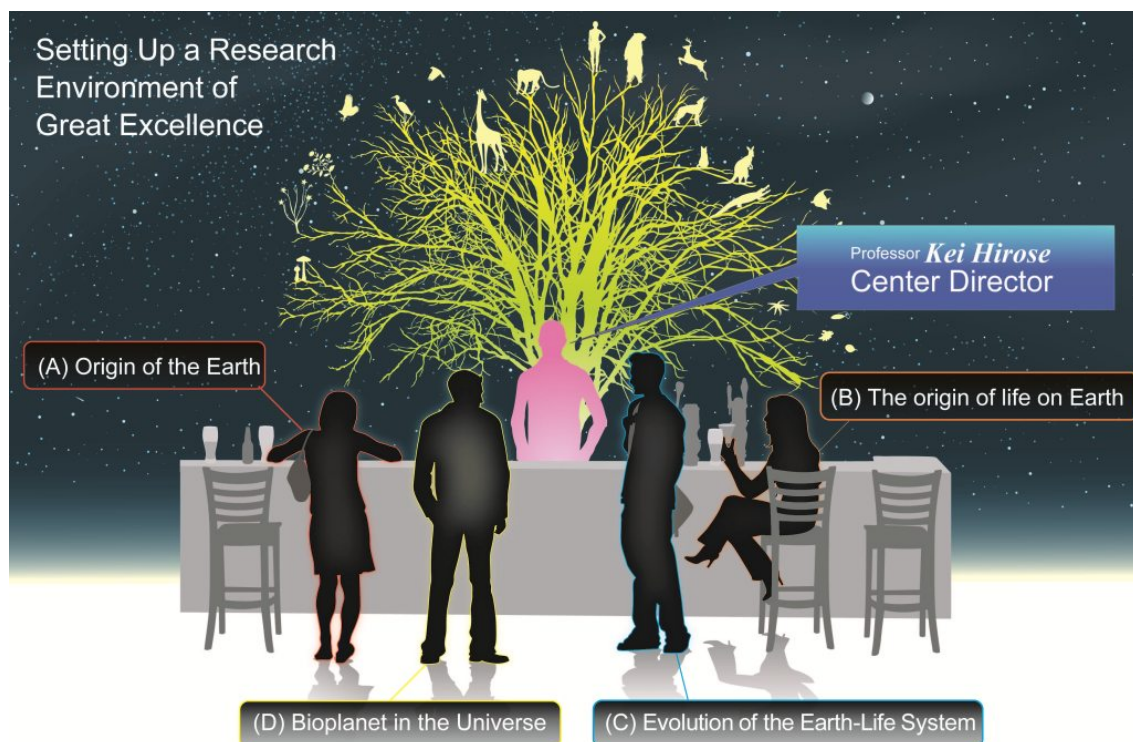
必要がある。

学際研究は、本 WPI プログラムも含め、さまざまな研究プログラムで推奨されている。しかし、これを実行に移すのは容易ではない。たとえば、学際研究を志す研究者同士は通常異なる建物に居室を持ち、コミュニケーションは必然的に限られたものなる。たとえ研究資金に恵まれたとしても、物理的に離れた環境では異分野融合研究は実際なかなか進まない。

本拠点ではまず、異なる分野の研究者を 1 つの建物に結集させる。このことにより、研究者同士の日常的なコミュニケーションは自然と盛んになる。加えてコモンルームを設け、すべてのメンバーが交流を深める日常的なプログラムを用意する。しかし、それでもまだ不十分である。大学でとなり同士にオフィスを構える研究者ですら、あまり話をしないケースは多々ある。

有名なプリンストン高等研究所は数学・天文学・社会学・歴史学の研究者から構成されている。設立から最初の 70 年間は、4 つの分野間の交流を深める取り組みはうまくいかなかった。しかし今から 10 年前に学際研究プログラムがスタートし、4 つの分野間の橋渡しが機能するようになった。それらは外部評価委員会のレポートでも高く評価されている。

プリンストン高等研究所の学際プログラムの成功を聞きつけ、われわれはその責任者である Piet Hut 教授を本拠点の主任研究者として招くことにした。彼には東工大に毎年半年間滞在し、オリジナルな交流促進プログラムを本拠点でも実行してもらう。さらにプリンストン滞在中は、研究者の交換・拠点事務員の受け入れ・外国人研究者のリクルートにあたってもらう。プリンストン高等研究所は本拠点活動のサテライト機関として、これらの面で機能する。



日本は国際交流という点では欧米諸国に大きく遅れをとっている。海外の研究者が日本で研究生活を送るにはいくつかのハードルがある。もっとも大きなハードルは言葉の問題に起因する、周囲からの疎外感ではないだろうか。そこで、本拠点では英語の公用語化を徹底する。本拠点事務員を海外サテライト（プリンストン高等研究所）へ数ヶ月間派遣し、世界に開かれた研究組織の事務を勉強してもらう。30名を超える外国人研究者他、サバチカル中の外国人著名研究者を長期間招待する。一方、日本人研究者も海外サテライトや連携機関に積極的に滞在させ、人的ネットワークを拡げてもらう。

3. 広報の強化

われわれの成功は、拠点の知名度にかかっていると言っても過言ではないだろう。海外の著名な研究者、アクティブな若手研究者の獲得には、主任研究者個人レベルの信用に加え、拠点の認知度が重要である。また、WPI プログラムが終了した後も、本拠点の活動を維持する必要がある。それには主任研究者らによる競争的資金の獲得のみならず、大学からの継続的なサポート、外部の財団や企業からの寄付金などが重要なリソースになる。そのようなリソースの獲得にも、拠点の高い知名度が大きな助けとなるだろう。

以上を鑑み、拠点の広報活動には最大限の力を注ぐ覚悟がある。拠点長はあらゆる機会を通じて、国内外に拠点の存在をアピールする。複数の主任研究者が関連学会の会長を務めている。それらが持つ国際ネットワークも大きな助けとなるだろう。

広報部門の実務は、複数の専属サイエンスコミュニケーターが担う。まずは、研究成果の積

極的な発信を行う。論文発表時に加え、記者やレポーター、サイエンスライターとの会見は定期的に開く。一般社会向けの定期講演会、高校生向けのサマーインターンプログラムも実施する。幸いにして、本拠点のアウトリーチ活動はやりやすい環境にある。生命の起源、地球外生命に関する話題は間違いなく社会の関心を集めるだろう。さらに、国内では「はやぶさ」の帰還が大きな注目を集めた他、アストロバイオロジー、太陽系外惑星、センターオブジアース、スノーボールアースなどに関する新書本や映画などが最近相次いで出されており、本拠点の研究に関連深いキーワードが社会に広く認知されつつある。

また、拠点の広報活動を大学のそれとリンクさせる。これは東工大の知名度を高めることにもなる。MIT や CalTech のアメリカ国内の認知度は、日本における東工大のそれを遥かにしのぐ。国内外における知名度の低さは東工大の弱みであり、大学の国際化が叫ばれる中で、今がそれを克服すべき時である。本拠点活動はその一助となるだろう。同時に大学に対してはその広報部の強化を促していく。

ホスト機関からのコミットメント（日本語で記載）

日 付 2017年2月21日

文部科学省 宛

ホスト機関名 国立大学法人 東京工業大学

ホスト機関の長の役職・氏名 学長・三島良直
署名

「世界トップレベル研究拠点プログラム」に採択された「地球生命研究所」に関し、以下に示す事項について責任をもって措置していくことを確認する。

＜中長期的な計画への位置づけ＞

※「当該拠点をホスト機関の中長期的な計画上に明確に位置づけ」ということに関し、どのような計画にどのような形で位置づけるかについて具体的に記載。

本学は、創立150周年を迎えようとする2030年を目処に世界のトップ10に入るリサーチユニバーシティに位置する大目標を平成25年10月に掲げ、その端緒として教育研究組織の再構築を進めてきており、研究に関する基本的な目標として、「（１）国際競争力の高い研究の強力な推進とそのための研究マネジメント強化（２）「真理の探究・知識の体系化」、「産業への貢献・次世代の産業の芽の創出」、「人類社会の持続的発展のための諸課題の解決」を目指した研究成果を創出するための研究組織の構築と、社会からの期待に応え、自ら改善・展開できる柔軟性の高い研究組織の運用（３）総合的な研究力を高めるための、学内資源の効率的配分・運用と環境整備」を掲げている。

第２期中期目標・中期計画には、以下のとおり明確に記載している。

＜中期目標＞

「（１）研究水準及び研究の成果等に関する目標

I-2-2. 本学で創造された価値の活用を推進し、社会での応用を目指すとともに、融合領域・新規領域を積極的に開拓する。」

＜中期計画＞

「（１）研究水準及び研究の成果等に関する目標を達成するための措置

【25-2】世界トップレベル研究拠点「地球生命研究所」において、初期地球にフォーカスし、地球と生命の起源と進化を互に関連づけて明らかにすることを目指す研究を推進するとともに、このための組織整備等を重点的に行う。」

平成28年度からの第３期中期目標・中期計画には、以下のとおり明記している。

＜中期目標＞

「（１）研究水準及び研究の成果等に関する目標

I-2-2. 内外の研究者を惹きつけ革新的な科学・技術を先導していくため、本学で創造された知を発展させ、融合領域・新規領域を積極的に開拓する。」

＜中期計画＞

「（１）研究水準及び研究の成果等に関する目標を達成するための措置

【15】世界トップレベル研究拠点「地球生命研究所」において、初期地球にフォーカスし、地球と生命の起源と進化を互に関連づけて明らかにすることを目指す研究を学長裁量資源の提供等により推進する。」

また、本学は、本中期目標・中期計画において、ELSIを「戦略性が高く、意欲的な目標・計画」として位置づけている。

＜具体的措置＞

※ 以下のそれぞれの事項について、具体的措置を記載。

- 1) 当該拠点が、拠点運営及び拠点における研究活動のために、本プログラムからの支援額と同程度以上のリソースを当該拠点に参加する研究者が獲得する競争的資金等の研究費、ホスト機関からの現物供与等（人件費の部分負担、研究スペースの提供等）もしくは外部からの寄付等により確保するに当たり必要な支援を行う。

本学は以下のようなリソース確保の支援を行う。

- 既存拠点形成措置額として毎年9,000万円の学長裁量経費の支援を行っている。また、本学が提供する学長裁量スペース料の一部を免除している。
- テニユアの教員6名をELSIに措置し、テニユアの教員については、学部（学士課程）教育を免除することに伴い、当該教育に支障が生じないよう、学長裁量による教員ポスト3名を引き続き、措置し、また、専任の事務職員2名をELSIに配置しており、継続して、必要な支援を行う。
- キャンパス内の既存建物（2,670m²）を地球生命研究所棟（ELSI-2）として提供した。また、新たな研究棟（ELSI-1：5,000m²）を平成27年度に竣工し、ふさわしい研究環境を整備している。
- 研究戦略推進センターが中心となり、国際部や研究推進部等からの申請の支援、国際学術雑誌への投稿・掲載料の経費支援、外国人研究者向けの科研費の説明会の他、情報収集や申請のための助言、ヒアリング練習などのサポートを行うなど、競争的外部資金等の獲得の様々な支援を行っている。さらに、本学はグローバルファンドを戦略的に獲得するため、法人格を有する海外拠点の設置を進めている。

- 2) 拠点運営に一定の独立性を確保するため、「拠点構想」実施に当たって必要な人事や予算執行等に関し、実質的に拠点長が判断できる体制を整える。

- 本学は、ELSIを学長が特に認める研究拠点組織（研究特区）として学長直属の組織として位置づけ、従来の慣例や運営体制にとらわれない柔軟な研究システムの構築・確立・発展を促すと共に、国際的な認知度を高めつつ、世界の研究者を惹きつける研究を実施する組織として研究改革のフロントランナーとして位置付けており、拠点長が（自身の任命権を除く）人事・予算執行等を含む拠点の運営についての権限を有する体制にしている。

これにより拠点長は組織改革、国際公募による研究者の採用等、拠点全体の予算や所長ファンドの採択等を司る。また、優れた成果・貢献があった研究者、事務員については、拠点長が直接評価し、インセンティブを付与する。

- 3) 機関内研究者を集結させるに当たり、ホスト機関内の他の部局における教育研究活動にも配慮しつつホスト機関内での調整を積極的に行い、拠点長を支援する。

- ELSIに参画する本学所属の研究者について、その所属部局の教育研究活動に支障が生じないよう、当該部局に対して代替教員の確保等、必要な支援を行うなど、部局との調整を積極的に行い、拠点長の活動を支援する。
- テニユアの教員については、学部（学士課程）教育を免除したため、当該教育に支障が生じないよう、学長裁量による教員ポスト3名を元部局に配置し、元部局では教員補充を行い学部教育の充実を図っている。これにより、他部局の教員がさらにELSIの研究に参画できることが可能となっている。

- 4) 機関内の従来の運営方法にとらわれない手法（英語環境、能力に応じた俸給システム、トップダウン的な意思決定システム等）を導入できるように機関内の制度の柔軟な運用、改正、整備等に協力する。

- ELSIにおける有期雇用職員の賃金に関する取扱いに関する規則を制定し、研究成果評価、能力に基づく賃金体系を採用している。また、特に貢献のあった者に対する報奨制度を制定し、インセンティブを支給している。
- トップレベルの研究者を獲得し、研究を推進するため、クロス・アポイントメント制度を整備した。
- 英語による支援環境を整備し、外国人研究者が来日後早い段階で安心して研究に専念できるよう、

本学の外国人研究者用宿泊施設である国際交流会館のうち20室を優先的に入居するために確保するほか、ビザ取得支援、住所登録や銀行口座等の各種手続き等などの生活支援を行っている。また、日本語教室を開設し、日常生活で利用できる日本語を教えている。

- 学長、研究担当理事・副学長及び総務・財務担当理事・副学長と拠点長との意見交換会を毎月1回開催し、ELSIの円滑な運営を図るため、必要性に応じて、学内制度の柔軟な運用、改正、整備等を行う体制にしている。

5) インフラ（施設（研究スペース等）、設備、土地等）の利用に関し便宜を図る。

- 拠点に参加する異分野の研究者が日常的に交流し、研究できる環境を整備するため、大学は、キャンパス内の既存建物（2,670m²）を地球生命研究所棟（ELSI-2）として提供した。また、大学の敷地の提供をし、新たな研究棟（ELSI-1：5,000m²）を平成27年度に竣工した。
- ELSIの外国人研究者用に大学の国際交流会館のうち20室を優先的に入居するために確保している。
- 拠点を設置する大岡山キャンパスは、都心から電車で30分程度の駅前に立地しており、国際シンポジウムの開催も可能な大小複数の会議場、講堂、図書館、レストランなどがあるため、世界トップレベルの研究者を集めた研究集会などに適している。これら共有スペースの優先的使用に便宜を図る。
- 今後、キャンパス整備を進め、当該拠点の成長に応じて、さらなるスペースの支援をする用意がある。

6) 本プログラムの実施期間が終了した後も、当該拠点が「世界トップレベル拠点」であり続けるために必要な支援を行う。

- 本学は、本プログラムの実施期間終了後も、ELSIを研究特区に位置づけ、恒久的に世界トップレベル研究拠点であり続けるため、テニユア教員6名を含むフルタイム主任研究者10名相当、および必要な実務スタッフを配置し、毎年9,000万円の学長裁量経費及び学長裁量スペース等の支援を継続して行う。
- 引き続き、充実した研究環境、研究に専念できる環境、大学院学生教育を始め若手研究者の育成、世界トップレベルの研究者との交流、異分野融合研究の推進等、研究者自らの探究の場を提供するとともに、きめ細かな外国人支援体制を推進する。
- 米国のジョン・テンブルトン財団から大型研究資金を獲得した経験を活かし、グローバルファンドを戦略的に獲得するため、法人格を有する海外拠点の設置を進めており、プログラム終了後も、当該拠点が学外からの継続的なサポート（競争的資金、財団や企業からの寄付）を得るのに必要な支援を行う。
- 第3期中期計画に「世界トップレベル研究拠点「地球生命研究所」において、初期地球にフォーカスし、地球と生命の起源と進化を互いに関連づけて明らかにすることを目指す研究を学長裁量資源の提供等により推進する。」と明記しているとおり、大学は世界トップレベル研究拠点として必要な支援を行う。

7) その他、当該拠点が「拠点構想」を着実に実施し、名実ともに「世界トップレベル拠点」となるために最大限の支援をする。

- 本学は、ELSIの世界最先端の研究者が大学院学生を教育研究指導することは次世代の研究者育成に資することから、積極的に大学院生の教育研究指導に参画できる体制を構築し、ELSI独自の国際教育プログラムの創設を支援する。
- 当該拠点を真の世界的な研究拠点とするためには、当該拠点の活動を国内外で広く認知してもらい、プレゼンスを高めることがきわめて重要である。このような観点から、当該拠点の広報活動を大学の広報に取り込み、情報発信する。
- 本学は、ELSIのノウハウを活かした「Tokyo Tech World Research Hub Initiative (WRHI)」を新たな研究領域や次世代産業の芽の創出を目指す科学技術創成研究院に置いた。これにより、世界から第一線級の研究者、研究グループの招へいなどを通じた、国際的ネットワークの強化や学生、教職員の国際交流の飛躍的な活性化により、東京工業大学が理工系分野における知と人材の世界的環流の研究ハブとなることで「真の国際化」を目指す。

(添付様式)
(日本語で記載。)

添付資料

主任研究者リスト

- ※ 主任研究者が10名を超える場合は、その数に応じて作成。
※ 「世界トップレベル」と考えられる研究者については、その氏名の右側に「*」印を付す。
※ 年齢は、2017年4月1日時点とする。
※ 2017年4月1日時点で、当該構想に所属できないものについては、備考の欄に、参加予定時期を明記する。

	氏 名	年齢	現在の所属 (機関、部局、専攻等)	現在の専門 学 位	備 考
1	廣瀬 敬*	49	東京工業大学 地球生命研究所 教授	高圧地球科学 (理学博士)	
2	丸山 茂徳*	67	東京工業大学 地球生命研究所 教授	地質学 テクトニクス 地球生命史 (理学博士)	
3	井田 茂*	56	東京工業大学 地球生命研究所 教授	惑星科学 惑星物理学 (理学博士)	
4	Piet HUT*	64	フロンティア高等研究所 (アメリカ) 東京工業大学 地球生命研究所 教授	理論天文物理学 学際研究 (Ph.D.)	
5	吉田 尚弘*	62	東京工業大学 物質理工学院 教授	環境化学 地球環境変動 (理学博士)	

(ホスト機関名: 拠点構想の名称:)

(添付様式)

6	入船 徹男*	62	愛媛大学 地球深部ダイナミクス 研究センター 教授	高圧地球科学 物質科学 (理学博士)	
7	Joseph Lynn KIRSCHVINK*	63	カリフォルニア工科大学 (アメリカ) 東京工業大学 地球生命研究所 教授	地球生物学 古地磁気学 生物物理学 神経生物学 (Ph.D.)	
8	John HERNLUND	44	東京工業大学 地球生命研究所 教授	地球物理学モデ リング 流体力学 固体力学 (Ph.D.)	
9	Jack W. SZOSTAK*	64	ハーバード大学 医学大学院 (アメリカ)	分子生物学 合成生物学 (Ph.D.)	
10	George HELFFRICH	64	東京工業大学 地球生命研究所 教授	地質学 (Ph.D.)	
11	Eric SMITH	51	東京工業大学 地球生命研究所 教授	高エネルギー粒 子物理学 複雑系科学 (Ph.D.)	
12	Irena MAMAJANOV	41	東京工業大学 地球生命研究所 教授	物理化学 (Ph.D.)	

(ホスト機関名: 拠点構想の名称:)

(添付様式)

13	上野 雄一郎	42	東京工業大学 理学院 准教授	生物地球化学 (理学博士)	
14	Shawn McGLYNN	33	東京工業大学 地球生命研究所 准教授	進化生物学 微生物学 (Ph.D.)	
15	中村 龍平	40	東京工業大学 地球生命研究所 教授	生体機能触媒 (理学博士)	

東京工業大学-1

地球生命研究所